



M 2014

O RUÍDO AMBIENTAL DE AEROGERADORES DE PEQUENA DIMENSÃO

ANA RITA DOS SANTOS COSTA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO APRESENTADA

À FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO EM

ÁREA CIENTÍFICA: ENGENHARIA CIVIL – ESPECIALIZAÇÃO EM CONSTRUÇÕES

O RUÍDO AMBIENTAL DE AEROGERADORES DE PEQUENA DIMENSÃO

ANA RITA DOS SANTOS COSTA

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de
MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM CONSTRUÇÕES

Orientadora: Professora Doutora Cecília Alexandra Abreu Coelho da
Rocha

JULHO 2014

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2013/2014

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446



miec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440



feup@fe.up.pt



<http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2013/2014 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2014.*

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respetivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão eletrónica fornecida pelo respetivo Autor.

Ao Luís

AGRADECIMENTOS

À minha orientadora, a Professora Cecília Alexandra Abreu Coelho da Rocha, pelo apoio, orientação e disponibilidade demonstrados ao longo da elaboração deste trabalho.

Ao Engenheiro António Eduardo da Costa pela ajuda na realização dos ensaios e pelas dicas prestadas na realização do trabalho.

À minha família e amigos que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho.

RESUMO

Nos últimos anos, registou-se um rápido crescimento da potência instalada de energia eólica em todo o mundo. Uma das componentes que tem contribuído para esse crescimento é a energia eólica produzida a partir de aerogeradores de pequenas dimensões instalados em meio urbano. Contudo, a instalação destes aerogeradores levanta preocupações relativamente ao impacto sonoro causado por estes sistemas, sobretudo devido à sua proximidade com a atividade humana, o que pode resultar em incómodo para a população exposta.

Desta forma, um dos aspetos a ter em conta na localização de um pequeno aerogerador é o ruído causado pelo seu funcionamento. Importa, por isso, perceber os níveis de ruído que este tipo de sistemas emitem e acrescentam ao ruído ambiente já existente e o grau de incomodidade que induzem na envolvente mais próxima.

Este trabalho tem, portanto, como objetivo, não só investigar e caracterizar o ruído específico de aerogeradores de pequena dimensão e o respetivo potencial de incomodidade mas ainda investigar e analisar os procedimentos de licenciamento atualmente existentes não apenas a nível nacional mas por comparação com alguns dos que são aplicados a nível internacional.

Pretende-se analisar se o tipo de licenciamento é o mais adequado à situação nacional (no contexto das avaliações realizadas) ou se a identificação de incomodidades ou incumprimentos sugere a necessidade de procedimentos distintos.

Procedeu-se à caracterização acústica do ruído de alguns aerogeradores através de medições de ruído ambiente utilizando, na medida do possível, a metodologia definida na Norma Portuguesa NP ISO 1996-2011 e usando como parâmetro de medição o L_{Aeq} . Os aerogeradores selecionados para casos de estudo práticos localizam-se nos concelhos de Vila do Conde e de Chaves, atendendo à possibilidade de realização de medições com o equipamento em funcionamento e à sua inserção no território, respetivamente, urbana e periurbana.

A diferença entre o valor do parâmetro L_{Aeq} do ruído ambiente local com o aerogerador em funcionamento, e o valor deste parâmetro sem a presença do aerogerador, nas mesmas condições meteorológicas, permitiu obter o valor do ruído específico do aerogerador em estudo, proceder à sua caracterização acústica e avaliar o grau de incomodidade pelo diferencial entre as duas situações. É ainda feita uma comparação dos resultados de níveis de ruído obtidos com os limites dos indicadores L_n e L_{den} e do Critério de Incomodidade constantes no Regulamento Geral de Ruído.

Os resultados obtidos permitiram concluir que, para os aerogeradores analisados e medidos, os níveis de ruído não são compatíveis com os critérios presentes no atual Regulamento Geral de Ruído.

Concluiu-se ainda que, sendo necessário analisar e avaliar o ruído causado por qualquer aerogerador de pequena dimensão, tal tem de ser realizado caso a caso, consoante as características do local de instalação e da sua envolvente construída mais próxima.

Das medições realizadas e tendo em atenção a obrigatoriedade de cumprimento do RGR, demonstrou-se ser necessária a implementação de um programa de monitorização que valde as previsões dos estudos apresentados para licenciamento destas unidades de produção de energia, nas condições de real funcionamento dos equipamentos.

PALAVRAS-CHAVE: Acústica, Ruído Ambiente, Incomodidade, Energia eólica, Aerogeradores, Nível sonoro

ABSTRACT

In the last years, there was a rapid growth of installed wind power capacity worldwide. One of the contributing factors for this growth is the wind energy produced from small wind turbines sited in the urban built environment. However the siting of these wind turbines raise concerns about their environmental impact with respect to noise, mainly due to their proximity to the human activity, which may result in annoyance for the exposed population.

Therefore, an aspect to take into account on the location of a wind turbine is the environmental noise caused. It is then necessary to understand the noise levels emitted by these small systems and their contribution to increase the existent ambient noise, as well as the annoyance level they induce in the near surroundings.

This work aims not only to research and characterize the specific noise from small wind turbines and its potential of annoyance, but also to research and analyse the permitting procedures in place today, not only at a national level but also by comparison with some of the ones that are currently applied at an international level.

It is intended to analyse if the licensing type is the most suitable for the national situation (in the context of this assessments) or if the identification of annoyances or infringements suggests the need of different procedures.

The acoustic characterization of the cases studies was conducted, through environmental noise measurements, using as far as possible, the methodology defined in the Portuguese standard NP ISO 1996-2011 and the L_{Aeq} as measurement parameter. The small wind turbines selected, as case studies, are located in the municipalities of Vila do Conde and Chaves, given the possibility of performing measurements with those equipments in operation and their territorial insertion, respectively, in urban and peri-urban areas.

The difference between the value of the parameter L_{Aeq} of environmental noise with the wind turbine operating, and the value of same parameter without the operation of that equipment, under the same weather conditions, allows to obtain the value of the specific noise of the wind turbine, and to acoustically characterize the wind turbine. With these results, it is possible to assess the level of annoyance through the difference between the two situations and to compare them with the limits of the indicators L_n and L_{den} and of the Annoyance Criterion present on the *Portuguese Noise Code (RGR)*.

The results showed that, for the analysed and measured wind turbines, the noise levels are not compatible with the criteria stated in the current Portuguese Noise Code.

It was also concluded that it is necessary to analyse and evaluate the noise caused by any small wind turbine, on a case by case basis, depending on the characteristics of the installation site and the surrounding built environment.

Considering the performed measurements and the obligation to comply with the RGR, it has been demonstrated the need for the implementation of a monitoring program to validate the predictions of the studies submitted for licensing these units of energy production, in the effective operating conditions.

KEYWORDS: Acoustics, Environmental Noise, Annoyance, Wind Energy, Wind Turbines, Sound level,

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	III
RESUMO	V
ABSTRACT	VII
ÍNDICE DE FIGURAS	XIII
ÍNDICE DE QUADROS	XIX
SÍMBOLOS, ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS	XXI
1 INTRODUÇÃO	1
1.1. ENQUADRAMENTO	1
1.2. OBJETIVOS.....	2
1.3. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	2
2 FUNDAMENTOS E CONCEITOS TEÓRICOS EM ACÚSTICA.....	3
2.1. INTRODUÇÃO.....	3
2.2. CONCEITOS	3
2.2.1. SOM <i>VERSUS</i> RUÍDO E A AUDIÇÃO HUMANA.....	3
2.2.2. PRESSÃO, INTENSIDADE E POTÊNCIA SONORA	4
2.2.3. FREQUÊNCIA, BANDAS DE FREQUÊNCIA E FONE	7
2.2.4. ANÁLISE NO TEMPO.....	9
2.3. RUÍDO E SUA PROPAGAÇÃO	10
2.3.1. TIPOS DE RUÍDO	10
2.3.2. TIPOS DE FONTES SONORAS	12
2.3.3. PROPAGAÇÃO DO SOM.....	13
2.4. INCOMODIDADE SONORA.....	16

3 A ENERGIA EÓLICA.....	19
3.1. INTRODUÇÃO.....	19
3.2. DA ANTIGUIDADE À ATUALIDADE.....	20
3.3. A ENERGIA EÓLICA NO CONTEXTO DAS ENERGIAS RENOVÁVEIS	22
3.3.1. INTRODUÇÃO	22
3.3.2. ENERGIAS RENOVÁVEIS EM PORTUGAL	26
3.4. MERCADO EÓLICO MUNDIAL	29
3.5. MERCADO EÓLICO EUROPEU	30
3.6. MERCADO EÓLICO PORTUGUÊS	31
3.6.1. INTRODUÇÃO	31
3.6.2. O SISTEMA ELÉTRICO NACIONAL	33
3.6.3. PRODUÇÃO DESCENTRALIZADA DE ENERGIA: MICRO E MINIPRODUÇÃO.....	35
3.6.3.1. Introdução.....	35
3.6.3.2. Enquadramento legal	35
3.6.3.3. Micro e Miniprodução Eólica	36
3.7. POTENCIAL EÓLICO PARA SOLUÇÕES DE PEQUENA GERAÇÃO	38
3.7.1. CARACTERIZAÇÃO DO RECURSO EÓLICO.....	38
3.7.1.1. Avaliação eólica: macro escala	40
3.7.1.2. Avaliação eólica: microescala	41
3.7.2. AVALIAÇÃO DO RECURSO EÓLICO.....	43
4 AEROGERADORES.....	47
4.1. CLASSIFICAÇÃO DE AEROGERADORES	47
4.2. CONSTITUIÇÃO DE UM AEROGERADOR.....	47
4.3. AEROGERADORES DE PEQUENA DIMENSÃO	49
4.3.1. INTRODUÇÃO	49
4.3.2. TURBINAS DE EIXO HORIZONTAL Vs. TURBINAS DE EIXO VERTICAL	52
4.3.3. UM AEROGERADOR DE PEQUENA DIMENSÃO PORTUGUÊS	54
4.3.4. TIPOS DE APLICAÇÕES.....	55

5 RUÍDO DE AREOGERADORES	59
5.1. INTRODUÇÃO	59
5.2. FONTES DE RUÍDO DE AEROGERADORES	59
5.2.1. FONTES DE RUÍDO MECÂNICO	60
5.2.2. FONTES DE RUÍDO AERODINÂMICO	61
5.3. RUÍDOS ESPECÍFICOS DE TURBINAS EÓLICAS DE PEQUENA DIMENSÃO	63
5.4. CARACTERÍSTICAS DO RUÍDO DE AEROGERADORES.....	64
5.5. PERCEÇÃO DO RUÍDO.....	65
5.6. LICENCIAMENTO DE AEROGERADORES DE PEQUENA DIMENSÃO	67
5.6.1. LEGISLAÇÃO PORTUGUESA.....	68
5.6.2. LEGISLAÇÃO INTERNACIONAL.....	71
5.6.2.1. Estados Unidos da América - Califórnia	71
5.6.2.2. Canadá	72
5.6.2.3. Reino Unido	73
5.6.2.4. Países Baixos 2006	74
5.6.2.5. França.....	75
6 CASOS DE ESTUDO	77
6.1. INTRODUÇÃO	77
6.2. CASOS DE ESTUDO TEÓRICOS	78
6.2.1. PROCEDIMENTOS DE MEDIÇÃO SEGUNDO A NORMA IEC 61400-11	79
6.2.2. CASO DE ESTUDO 1 - AEROGERADOR <i>GAIA-WIND</i> 11-KW (COLORADO – EUA)	80
6.2.3. CASO DE ESTUDO 2 - AEROGERADOR <i>BORNAY INCLIN</i> 1500 (NARBONA, FRANÇA) ..	84
6.2.4. CASO DE ESTUDO 3 - AEROGERADOR <i>WHISPER</i> 40 (GOLDEN, EUA).....	87
6.2.5. CASO DE ESTUDO 4 – AEROGERADOR QR5 (PEMBROKESHIRE, UK)	90
6.2.6. CASO DE ESTUDO 5 (REINO UNIDO)	93
6.3. CASOS DE ESTUDO PRÁTICOS.....	100
6.3.1. EQUIPAMENTO UTILIZADO NAS MEDIÇÕES.....	100
6.3.2. PARÂMETROS DE ANÁLISE	101
6.3.3. PROCEDIMENTO DE MEDIÇÃO SEGUNDO A NP ISO 1996.....	101
6.3.4. CASO DE ESTUDO 1: (OURA – CHAVES)	102

6.3.5. CASO DE ESTUDO 2: MINDELO.....	106
6.4. ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS	116
7 CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	125
7.1. CONCLUSÕES.....	125
7.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	126

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1 - Variações de pressão atmosférica de uma onda sonora e correspondente forma de onda. Zonas de compressão, C (acima da pressão atmosférica) e zonas de rarefação, R (abaixo da pressão atmosférica) de uma onda sonora no ar [5].	4
Fig. 2 - Aparelho auditivo humano [6]	4
Fig. 3 - Escala linear de pressão sonora p em μPa e escala logarítmica de nível de pressão sonora, L_p , em dB, para alguns sons comuns e para uma pressão sonora de referência de 20 μPa [7].	6
Fig. 4 - Espetro sonoro de um mesmo ruído dividido em bandas de 1/1 oitava e 1/3 oitava [8].	8
Fig. 5 - Curvas de igual sensibilidade auditiva (em fone) [9].	8
Fig. 6 - Curvas de ponderação A e C [7].	9
Fig. 7 - Diferenças entre os parâmetros acústicos L_{eq} , L_{50} e L_{95} [8].	10
Fig. 8 – Ruído intermitente [7].	11
Fig. 9 – Ruído Impulsivo [7].	11
Fig. 10 – Ruído tonal [11] [7].	12
Fig. 11 - Exemplo de fonte pontual (a) e de uma fonte linear (b) [7].	13
Fig. 12 - Exemplo de uma fonte pontual (a) e de uma fonte linear (b) posicionadas junto ao solo [14].	13
Fig. 13 – Atenuação pela absorção do ar em função da frequência e da distância à fonte [7].	14
Fig. 14 - Gradientes de temperatura [7].	14
Fig. 15 - Efeito da variação da velocidade do vento com a altura na direção do recetor para a fonte [7].	15
Fig. 16 - Fenómenos de absorção, transmissão, reflexão e difração numa barreira acústica [13].	15
Fig. 17 - Exposição ao ruído em países da União Europeia em 1996 [21].	17
Fig. 18 - Comparação da exposição ao ruído de tráfego rodoviário, ferroviário e aéreo entre a população residente em Lisboa e nas grandes aglomerações da União Europeia [22].	18
Fig. 19 - Exemplo de um moinho de vento tradicional holandês (à esquerda) e de um <i>post mill</i> (à direita) [25].	20
Fig. 20 - <i>Smock mill</i> (à esquerda) e de um moinho de vento típico americano (à direita) [25].	20
Fig. 21 - Evolução, ao longo dos anos, da dimensão de turbinas eólicas modernas [26].	21
Fig. 22 - Comparação entre uma turbina de pequena dimensão e uma de larga escala [27].	22
Fig. 23 - Quota de energia renovável no consumo final de energia em 2011 [29].	23

Fig. 24 – Quota de energia de fontes renováveis no consumo final de energia em 2005, 2011 e metas para 2020 [29].	25
Fig. 25 - Peso da produção de energia elétrica a partir de energia proveniente de fontes renováveis na produção bruta + saldo importador, em 2012 [31]	25
Fig. 26 - Repartição da produção de energia elétrica, em Portugal e por fonte de energia, em 2011 e 2012 [34].	27
Fig. 27 - Evolução da energia produzida em Portugal a partir de fontes renováveis (FV- Fotovoltaica, EOL – Eólica, RSU – Resíduos Sólidos Urbanos) (TWh) [31].	28
Fig. 28 - Evolução do peso da produção das energias renováveis na produção bruta+ saldo importador em Portugal Continental [31].	28
Fig. 29 - Capacidade total instalada de energia eólica entre 2010 e 2013 em MW [36].	29
Fig. 30 - Capacidade eólica instalada por país [36].	29
Fig. 31 – Capacidade de energia eólica instalada acumulada total por país [37].	30
Fig. 32 - Energia eólica instalada acumulada na UE em GW (à esquerda) e quota dos membros da UE na capacidade total instalada em 2012 (à direita) [38].	31
Fig. 33 - Percentagem de energia eólica do consumo total de eletricidade na União Europeia e por Estado Membro [38].	31
Fig. 34 - Potência instalada anualmente e potência acumulada, de energia eólica em Portugal [39].	32
Fig. 35 - Distribuição de parques eólicos em Portugal em Dezembro de 2012: potência ligada e em construção por concelho (à esquerda), potência total por parque eólico em funcionamento (à direita) [41].	33
Fig. 36 - Unidades de micro e miniprodução instaladas em Portugal.	37
Fig. 37 - Evolução ao longo dos anos do número de unidades de micro e miniprodução eólica.	38
Fig. 38 - Evolução da potência de ligação (kW).	38
Fig. 39 - Mudança brusca na rugosidade da superfície e regime de ventos em ambiente urbano [52].	39
Fig. 40 – Exemplo da curva de potência de uma turbina eólica [27].	40
Fig. 41 – Exemplo de um perfil de distribuição do vento e de uma rosa-dos-ventos [27].	41
Fig. 42 - Regimes de vento em meio urbano mostrando regiões “perturbadas” e regiões altamente turbulentas à volta de edifícios [54].	42
Fig. 43 - Várias posições de turbinas eólicas no caso do escoamento com “rugosidade induzida por edifícios isolados” [54]	42
Fig. 44 - Perfis de velocidades de vento associados a diferentes tipos de ocupação urbana e correspondente rugosidade aerodinâmica, Z_0 [54].	43

Fig. 45 – Distribuição espacial da velocidade média de vento estimada para diferentes alturas, (a) h=10 m, (b) h=60 m, (c) h=80 m [55].	44
Fig. 46 - Constituição de um aerogerador de eixo horizontal [23].	48
Fig. 47- Configurações de uma turbina de eixo horizontal (HAWT) e de uma turbina de eixo vertical (VAWT) [58].	51
Fig. 48 - Turbinas do tipo: <i>upwind</i> com sistema de orientação ativo (a), <i>upwind</i> com sistema de orientação passivo (b) e <i>downwind</i> com sistema de orientação passivo (c) [52].	52
Fig. 49 - Exemplos de turbinas de eixo vertical (VAWTs) [52].	52
Fig. 50 – Exemplos de turbinas de pequena dimensão de eixo vertical e horizontal, existentes no mercado [59].	54
Fig. 51 - Um modelo completo da T.Urban na EWEK 2008 [52] e características de Potência nominal [60].	55
Fig. 52 - Sistema eólico isolado [61].	56
Fig. 53 - Sistema Híbrido de energia eólica e solar [adaptado de [62].	56
Fig. 54 - Sistema eólico interligado à rede elétrica [adaptado de [63]]	57
Fig. 55 - Exemplo de turbinas eólicas integradas em edifícios em a) Manama b) Dubai c) Londres d) Glasgow [54].	58
Fig. 56 - Componentes e nível de potência sonora de uma turbina eólica e respetivos caminhos de transmissão de ruído: o ar (a/b) e os componentes estruturais (s/b) [65].	60
Fig. 57 - Ruído aerodinâmico [68].	61
Fig. 58 - Ruído da turbulência do fluxo [3].	61
Fig. 59 - Ruído do vórtice da extremidade da pá [3].	62
Fig. 60 – Ruído provocado pelo mecanismo de controlo <i>stall</i> [3].	62
Fig. 61 - <i>Laminar Boundary Layer Vortex Shedding Noise</i> [3].	62
Fig. 62 – Ruído de bordo de fuga da pá [3].	63
Fig. 63 - Exemplos de turbinas eólicas de pequena dimensão [64].	64
Fig. 64 – Incomodidade associada a várias fontes sonoras [2].	65
Fig. 65 - Níveis de pressão sonora de várias fontes e de uma turbina de pequena dimensão [71].	66
Fig. 66 – Propagação do ruído de aerogeradores [65].	67
Fig. 67 - Classificação de projetos eólicos e respetivos requerimentos de aprovação no Canadá (Ontário) [73].	72
Fig. 68 - Vista em planta das posições do microfone [80].	79
Fig. 69 – Localização do aerogerador <i>Gaia Wind</i> , Colorado (EUA) [82].	81

Fig. 70 – Níveis sonoros de ruído ambiente e de ruído residual do aerogerador <i>Gaia Wind</i> [82]	82
Fig. 71 – Espectro por banda de 1/3 de oitava para diferentes velocidades de vento do aerogerador <i>Gaia Wind</i> [82].	82
Fig. 72 - Níveis sonoros envolvidos na avaliação dos critérios de incomodidade e exposição do aerogerador <i>Gaia-Wind</i> .	83
Fig. 73 – Posição dos aerogeradores 1, 2, 3 e 4 e posições de medição 1, 3, 5 e 7 para o aerogerador <i>Bornay Inclín</i> [83].	85
Fig. 74 – Espectros por banda de 1/3 de oitava para o aerogerador <i>Bornay Inclín</i> 1500.	85
Fig. 75 - Níveis sonoros envolvidos na avaliação dos critérios de incomodidade e exposição para o aerogerador <i>Bornay Inclín</i> 1500.	86
Fig. 76 – Níveis sonoros correspondentes às velocidades de vento de 4, 6, 8, 10, 12 e 14 m/s para o aerogerador <i>Whisper</i> 40 [85].	88
Fig. 77 - Representação gráfica dos níveis sonoros envolvidos na avaliação dos critérios de incomodidade e exposição para o aerogerador <i>Whisper</i> 40	89
Fig. 78 – Aerogerador qr5 v1.2 VAWT em Pembrokeshire, UK [87].	90
Fig. 79 – Níveis sonoros correspondentes a diferentes velocidades de vento do aerogerador QR5 v1.2 VAWT [87].	91
Fig. 80 – Mapa de emissão de ruído do aerogerador QR5 v1.2 VAWT [87].	91
Fig. 81 - Níveis sonoros envolvidos na avaliação dos critérios de incomodidade e exposição para o aerogerador QR5 v1.2 VAWT.	92
Fig. 82 - Localização dos aerogeradores (T) e dos pontos de medição (M): (a) na instalação d relativa às micro turbinas Td1 e Td2; (b) na instalação b relativa aos aerogeradores de pequena dimensão Tb1 e Tb2 [3].	93
Fig. 83 – Dispersão mostrando a variação dos níveis sonoros com a velocidade de vento, na instalação d [3].	95
Fig. 84 – Medições com as turbinas em funcionamento e deligadas a velocidades de vento até 6,10 m/s na instalação d [3].	95
Fig. 85 - Níveis sonoros envolvidos na avaliação dos critérios de incomodidade e exposição dos aerogeradores Td1 e Td2.	96
Fig. 86 –Dispersão mostrando a variação dos níveis sonoros nos locais Mb2, Mb6 e Mb7 com a velocidade de vento, na instalação b [3].	97
Fig. 87 – Níveis sonoros em Mb1, Mb2, Mb6 e Mb7, a uma velocidade de vento de $\approx 1,33$ m/s dos aerogeradores Tb1 e Tb2 [3].	97
Fig. 88 - Níveis sonoros em Mb1, Mb2, Mb6 e Mb7 para as velocidades de vento indicadas para os aerogeradores Tb1 e Tb2 [2].	98

Fig. 89 - Níveis sonoros envolvidos na avaliação dos critérios de incomodidade e exposição dos aerogeradores Tb1 e Tb2.....	99
Fig. 90 - Sonómetro integrador da <i>Brüel & Kjær</i> 2260.....	100
Fig. 91 - Calibrador de Nível Sonoro4231.....	100
Fig. 92 – Higro-Termo-Anemómetro HTA 4200, constituído por: unidade indicadora; cabeça de sonda com cabo de conexão; sonda de humidade / temperatura com cabo de conexão. .	101
Fig. 93 – Caso de estudo prático 1 (Oura – Chaves).	103
Fig. 94 - Localização do aerogerador a que corresponde o caso de estudo prático 1, a amarelo e dos locais de medição, a vermelho (Oura – Chaves).	103
Fig. 95 – Local de medição 1 (à esquerda) e local de medição 2 (à direita) indicados pelas setas a laranja (Oura – Chaves).	104
Fig. 96 – Espectro sonoro do ruído ambiente (a azul) e do residual (a laranja) (Oura – Chaves).	105
Fig. 97 - Representação gráfica dos níveis sonoros envolvidos na avaliação dos critérios de incomodidade e exposição (Oura – Chaves).	106
Fig. 98 – Caso de estudo prático 2 (Mindelo)	107
Fig. 99 – Localização do caso de estudo prático 2 (Mindelo).....	107
Fig. 100 - Localização do caso de estudo 2 e dos onze locais de medição (Mindelo).	109
Fig. 101 – Locais de medição M1, M10 e M11 (Mindelo).	110
Fig. 102 – Local de medição M4 (Mindelo).	110
Fig. 103 – Local de medição M6 (Mindelo).	111
Fig. 104 – Local de medição M9 (Mindelo).	111
Fig. 105 - Níveis sonoros envolvidos na avaliação do critério de exposição (Mindelo).....	114
Fig. 106 - Níveis sonoros envolvidos na avaliação do critério de incomodidade (Mindelo).	114
Fig. 107 – Nuvem de pontos mostrando como os níveis de ruído variam com a velocidade de vento usando os vários locais de medição analisados (Mindelo).	115
Fig. 108 - Níveis sonoros envolvidos na avaliação do critério de incomodidade (Mindelo).	116
Fig. 109 – Níveis de ruído ambiente (RA) e residual (RR) relativo aos casos de estudo práticos.	116
Fig. 110 - Níveis sonoros de ruído ambiente e residual relativo ao caso de estudo teórico 3 (Golden) e caso prático 1 (Chaves), para uma velocidade de vento de 6 m/s.	117
Fig. 111 – Nível de ruído ambiente (RA) e acréscimo de ruído (Δ) devido ao aerogerador para os vários casos de estudo em função da velocidade de vento nos locais de medição.	119

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 1 - Valores centrais das bandas de frequência de 1/1 oitava e correspondentes valores numéricos das ponderações da curva A, na gama audível [8].	9
Quadro 2 - Definições de turbina eólica de pequena dimensão por vários países e instituições [37].	50
Quadro 3 - Características da T.Urban [60].	55
Quadro 4 - Limites máximos de Exposição em Função da Classificação de Zonas, de acordo com o RGR [8].	69
Quadro 5 - Valores de D em função da percentagem de tempo de emergência, q [8].	71
Quadro 6 – Distâncias recomendadas entre as turbinas eólicas e outras instalações nos Países Baixos [78].	75
Quadro 7 - Documentação necessária em função da altura da turbina, em França [81].	75
Quadro 8 - Características do aerogerador <i>Gaia Wind</i> [82].	80
Quadro 9 – Características do aerogerador <i>Bornay Inclín 1500</i> [83].	84
Quadro 10 - Especificações técnicas <i>Whisper 40</i> (Golden, EUA) [84].	87
Quadro 11 – Especificações técnicas do aerogerador QR5 v1.2 VAWT em Pembrokeshire [87].	90
Quadro 12 – Características das turbinas eólicas [3].	93
Quadro 13 – Distâncias (em m) entre os locais de medição (M) e os aerogeradores (T) [3].	94
Quadro 14 – Especificações técnicas de aerogeradores <i>Whisper</i> (Oura – Chaves) [89].	102
Quadro 15 - Valores obtidos nas medições nos locais designados de 1 a 2 (Oura – Chaves).	104
Quadro 16 – Especificações técnicas do aerogerador <i>Skystream 3.7</i> (Mindelo) [90].	107
Quadro 17 – Valores obtidos nos vários locais de medição.	108
Quadro 18 – Distância de cada local de medição à linha da costa (Mindelo).	110
Quadro 19 – Distâncias mínimas necessárias ao cumprimento dos critérios de exposição e incomodidade.	123

SÍMBOLOS, ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS

c – celeridade [m/s]

dB – decibel

E – exposição sonora [Pa^2s]

E_0 – exposição sonora de referência [$400 \mu\text{Pa}^2\text{s}$]

F – constante de tempo *Fast*

Hz – hertz

I – intensidade sonora [W/m^2]

I – constante de tempo *Impulsive*

K – penalizações para o cálculo do critério de incomodidade

L_A – nível sonoro, ponderado A [dB]

L_{Aeq} – nível sonoro contínuo equivalente, ponderado A [dB]

L_{A10} – nível sonoro excedido em 10% do tempo de medição, ponderado A [dB]

L_{A50} – nível sonoro excedido em 50% do tempo de medição, ponderado A [dB]

L_{A90} – nível sonoro excedido em 90% do tempo de medição, ponderado A [dB]

L_d – indicador de ruído diurno [dB(A)]

L_{den} – indicador de ruído diurno-entardecer-noturno [dB(A)]

L_e – indicador de ruído entardecer [dB]

L_E ou SEL – nível de exposição sonora ou *Sound Exposure Level* [dB]

L_{eq} – nível de pressão sonora contínua equivalente [dB]

L_{max} – nível máximo de pressão sonora [dB]

L_n – indicador de ruído noturno [dB]

L_N – nível de pressão sonora excedida em N% do tempo de medição [dB]

L_p – nível de pressão sonora [dB]

L_{peak} – nível de pressão sonora de pico [dB]

L_{RE} – nível de avaliação de exposição sonora [dB]

L_{Req} – nível de avaliação contínua equivalente [dB]

p – pressão sonora [Pa]

Pa – pascal

p_0 – pressão sonora de referência [2×10^{-5} Pa]

p_{ef} – pressão sonora eficaz [Pa]

p_{peak} – pressão sonora de pico [Pa]

q – tempo de emergência do ruído perturbador [%]

RMS – *Root Mean Square* (pressão Sonora eficaz)

S – constante de tempo *Slow*

t – tempo [s]

T – temperatura em graus kelvin [K]

w – watt

W – potência sonora [W]

ρ – massa volúmica do ar [$\approx 1,2 \text{ kg/m}^3$]

θ – temperatura em graus celsius [$^{\circ}\text{C}$]

AT – Alta Tensão

BT – Baixa Tensão

CFD – *Computacional Fluid Dynamics*

DL – Decreto-Lei

DRA – Diretiva Ruído Ambiente

EDP – Energias de Portugal

EUA – Estados Unidos da América

FER – Fontes de Energia Renováveis

FEUP – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

GIT – Grande Infraestrutura de Transporte

HAWT – *Horizontal Axis Wind Turbines* (Turbinas eólicas de eixo horizontal)

INETI – Instituto Nacional de Engenharia, Tecnologia e Inovação

ISMAI – Instituto Superior da Maia

ISO – Organização Internacional de Normalização

LNEG – Laboratório Nacional de Energia e Geologia

MT – Média Tensão

NP – Norma Portuguesa

PDM – Plano Diretor Municipal

PNAER – Plano Nacional de Ação para as Energias Renováveis.

PNAEE – Plano Nacional de Ação para a Eficiência Energética

PRE – Produção em Regime Especial

RDN - Rede Nacional de Distribuição de Eletricidade em Alta e Média Tensão

REN - Rede Elétrica Nacional

RESP - Rede Elétrica de Serviço Público

RGR – Regulamento Geral do Ruído

RLPS – Regime Legal sobre a Poluição Sonora

RNT - Rede Nacional de Transporte de Eletricidade

SEN – Sistema Elétrico Nacional

SRM – Sistema de Registo de Microprodução

SRMini – Sistema de Registo de Miniprodução

SWT – *Small Wind Turbine* (Turbina eólica de reduzida dimensão)

UE – União Europeia

VAWT – *Vertical Axis Wind Turbines* (Turbinas eólicas de eixo vertical)

1

INTRODUÇÃO

1.1. ENQUADRAMENTO

A União Europeia definiu como uma das suas prioridades a utilização de fontes renováveis para a produção de energia, tendo em vista o desenvolvimento sustentável [1]. Nesse contexto, a energia eólica emerge como uma peça central da nova economia energética, devido ao facto de ser inesgotável, à sua abundância e distribuição espacial, ao baixo custo e, ainda por ser uma tecnologia limpa.

O desenvolvimento tecnológico que permite transformar esta fonte de energia primária em energia eléctrica tem evoluído de forma exponencial e presentemente podem-se encontrar aerogeradores de pequena dimensão que surgem como uma forma de aproveitar a energia eólica em ambiente urbano ao permitir a integração desta tecnologia em edifícios.

Uma preocupação fundamental relacionada com a instalação deste tipo de equipamentos em meio urbano, especialmente perto de habitações e outros recetores sensíveis, é o ruído que o aerogerador possa emitir, com o consequente incómodo para as pessoas, bem como os efeitos adversos na sua saúde. Apesar disto, os estudos de ruído de aerogeradores de pequena dimensão são escassos, não existindo legislação específica ou mesmo um conjunto de regras e procedimentos, ao nível do licenciamento, que regule os níveis gerais de ruído associados a pequenos aerogeradores, ao contrário do que acontece para alguns parques eólicos, que estão sujeitos a procedimento de Avaliação de Impacte Ambiental.

Estes pequenos aerogeradores constituem assim uma nova fonte de ruído, em meio urbano, contribuindo para o aumento da poluição sonora existente, proveniente de outras fontes sonoras, como, o tráfego rodoviário, ferroviário e aéreo, a indústria, a construção ou o ruído de vizinhança. O ruído ambiente causado por estas fontes sonoras contribui para o desconforto e diminuição da qualidade de vida das pessoas e embora, de uma maneira geral, os níveis sonoros resultantes, não prejudiquem o sistema auditivo, podem causar efeitos nefastos severos tanto a nível fisiológico como psicológico.

Os níveis sonoros, relativos aos aerogeradores, podem ser medidos, mas de forma similar a outras preocupações ambientais, a percepção da população exposta ao impacte acústico de aerogeradores é, em parte, de determinação subjetiva. Segundo diversos estudos [2] [3], os aerogeradores podem induzir o mesmo grau de incomodidade que o tráfego rodoviário, aéreo e ferroviário, para níveis sonoros mais baixos e podem ainda ser considerados incomodativos por algumas pessoas, mesmo a uma distância de separação, entre os aerogeradores e o recetor, suficiente para que os níveis de ruído produzidos não causem interferências no discurso.

Neste contexto, surge a necessidade de caracterizar este novo tipo de fonte sonora, em ambiente urbano, e o seu potencial de incomodidade para a população exposta, bem como, perceber se as vantagens associadas a este tipo de tecnologia “limpa” compensam o impacto acústico causado.

1.2. OBJETIVOS

Os objetivos finais deste trabalho passam por caracterizar o ruído específico de aerogeradores de pequena dimensão e o respetivo potencial de incomodidade, bem como a sua interação com a envolvente humana e construída.

De forma a alcançar estes objetivos procede-se à avaliação do nível de ruído específico de cada um dos casos de estudo, através de medições de ruído ambiente e à análise da contribuição destes níveis de ruído para o ruído ambiente total e a sua comparação com os limites dos indicadores L_{den} e L_n e do Critério de Incomodidade constantes no Regulamento Geral de Ruído.

Outro objetivo deste trabalho passa por analisar os procedimentos de licenciamento atualmente existentes não apenas a nível nacional mas por comparação com alguns dos que são aplicados a nível internacional.

1.3. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

A presente dissertação estrutura-se em vários capítulos, que se descrevem de seguida.

No presente capítulo, Capítulo 1, faz-se um enquadramento do tema da dissertação e apresentam-se os objetivos e estrutura da própria dissertação.

O Capítulo 2 introduz uma breve descrição de conceitos e definições acústicas importantes, referidos ao longo da dissertação.

No Capítulo 3, faz-se uma exposição sobre o uso de energias renováveis, em particular no que concerne à energia eólica, dando especial ênfase ao caso de Portugal e às políticas energéticas e regulamentação existentes. É ainda apresentada uma breve história da evolução do uso do recurso eólico desde a antiguidade até aos dias de hoje, os tipos de tecnologia usada e o seu papel na sociedade.

No capítulo 4, apresenta-se o estado da arte tecnológico de aerogeradores de pequena dimensão, e no capítulo 5 descrevem-se as principais fontes e tipos de ruído associados a este tipo de tecnologia e o modo como este é percecionado pela população exposta. O capítulo 5 sumaria ainda a regulamentação existente noutros países, ao nível de licenciamento deste tipo de aerogeradores.

No capítulo 6 são descritos os casos de estudos, tanto teóricos como práticos, condições descritas nos estudos consultados e as características dos locais onde se encontram, bem como o processo que levou à sua localização e o motivo pelo qual foram selecionados. Os estudos consultados, ensaios realizados e os respetivos resultados são também descritos neste capítulo, no qual ainda se apresenta a análise e discussão dos resultados.

No capítulo 7, apresentam-se as conclusões deste trabalho, bem como possíveis propostas de desenvolvimentos futuros a realizar sobre este tema.

2

FUNDAMENTOS E CONCEITOS TEÓRICOS EM ACÚSTICA

2.1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo abordam-se conceitos básicos de Acústica Ambiental, de forma a melhor compreender o desenvolvimento da presente dissertação. É feita uma apresentação do enquadramento legal do ruído, bem como das normas e procedimentos adotados na medição de ruído ambiente, em Portugal.

A *Acústica* é a ciência do som que analisa a produção do som, a sua propagação desde a fonte ao recetor, bem como os mecanismos de deteção e perceção do som [4]. A acústica pode ser dividida em vários ramos, entre eles a Acústica Ambiental, que interessa para este trabalho.

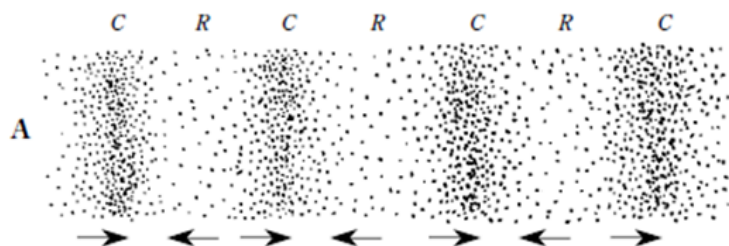
2.2. CONCEITOS

2.2.1. SOM *VERSUS* RUÍDO E A AUDIÇÃO HUMANA

O *som* pode ser definido como uma onda em movimento no ar ou noutro meio elástico (estímulo) ou como uma excitação do mecanismo auditivo da qual resulta a perceção do som (sensação) [5].

A propagação de ondas sonoras no ar tem origem em variações da pressão atmosférica, cujo valor aproximado é de 101.400 Pa ($\approx 10^5$ Pa), causada por uma determinada fonte sonora, que faz com que estas se transmitam pelas partículas de ar até atingirem um recetor. O recetor pode ser o ouvido humano, um microfone ou um painel que, conseqüentemente entra em vibração.

Esta propagação é causada pela colisão das partículas de ar, umas com as outras, sucessivamente e sem deslocamento permanente das mesmas, uma vez que quando uma partícula de ar é deslocada da sua posição original, as forças elásticas do ar tendem a recolá-la na sua posição original. Essa propagação pode ser representada por uma série de compressões e rarefações do meio, como se pode observar na Fig. 1, onde os pequenos pontos representam as partículas de ar.



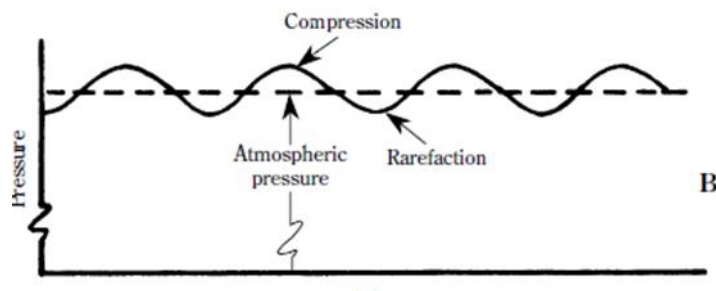


Fig. 1 - Variações de pressão atmosférica de uma onda sonora e correspondente forma de onda. Zonas de compressão, C (acima da pressão atmosférica) e zonas de rarefação, R (abaixo da pressão atmosférica) de uma onda sonora no ar [5].

No caso dos seres humanos, antes de chegarem ao cérebro e serem interpretadas por este, as ondas sonoras atravessam o sistema auditivo. De forma a melhor compreender este processo descreve-se, seguidamente, a constituição do sistema auditivo e o seu funcionamento.

O ouvido humano pode ser dividido em três partes principais: o ouvido externo, o ouvido médio e o ouvido interno, como se pode observar na Fig. 2.

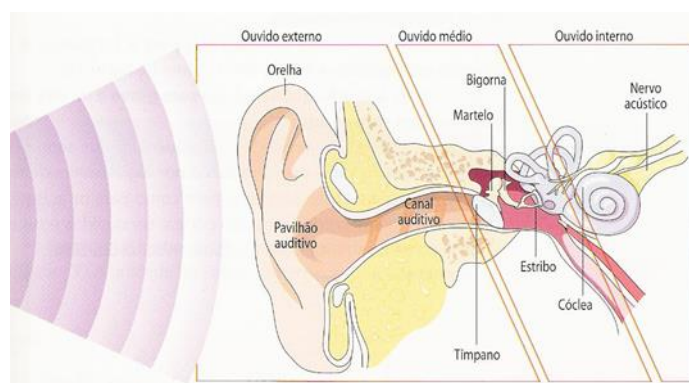


Fig. 2 - Aparelho auditivo humano [6]

As ondas sonoras são captadas no ouvido externo, no pavilhão da orelha e direcionadas pelo canal auditivo para o tímpano, que começa a vibrar na sua presença, sendo depois transmitidas, através dos três ossículos, que constituem o ouvido médio, para o ouvido interno. Aqui, a cóclea constituída pela membrana basilar e por um líquido, a perilinfa, entra em vibração, provocando o movimento dos cílios e permitindo a transmissão da informação ao cérebro através de um fenómeno eletroquímico ao nível do nervo acústico.

A interpretação do som pelo cérebro pode resultar numa sensação agradável ou indesejada, sendo que, neste último caso, o som toma a designação de *ruído*.

2.2.2. PRESSÃO, INTENSIDADE E POTÊNCIA SONORA

As variações de pressão sonora provocadas pelas ondas sonoras, em relação à pressão atmosférica apresentam importantes alterações ao longo do tempo sendo, por isso, a pressão sonora eficaz ou *RMS* (*root mean square*), aquela que interessa analisar e que é avaliada pelo sonómetro.

A pressão sonora eficaz ou *RMS*, medida em Pa, pode ser determinada pela equação 1 a seguir apresentada.

$$p_{ef} = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} p^2(t) dt \quad (1)$$

Para um ser humano jovem, as variações de pressão sonora audíveis variam desde cerca de 20 μPa (2×10^{-5} Pa) até aproximadamente 100 Pa. Os 20 μPa de pressão sonora correspondem ao designado “*limiar da audição*”. Uma pressão sonora de aproximadamente 100 Pa é tão alta que causa dor e é consequentemente denominada como o “*limiar da dor*”.

A razão entre estes dois extremos é superior a 1 milhão [7], o que corresponde a uma significativa amplitude de variação. Devido a esta ampla variação de pressões sonoras e ao facto de o ouvido humano ter uma resposta, no domínio da audição, aproximadamente logarítmica e não linear, convencionou-se expressar os parâmetros acústicos como uma razão logarítmica entre o valor de pressão sonora medido e um valor de pressão sonora de referência, com a vantagem adicional de se passar a utilizar uma escala com uma amplitude mais reduzida.

O resultado é o **nível de pressão sonora** que se traduz pela equação 2.

$$L_p = 10 \times \log_{10} \left(\frac{p}{p_0} \right)^2 = 20 \times \log_{10} \frac{p}{p_0} \quad (2)$$

Onde, L_p designa o nível de pressão sonora em decibel (dB);

p a pressão sonora em Pa;

p_0 a pressão sonora de referência (2×10^{-5} Pa).

Na Fig. 3, pode-se verificar a vantagem de usar a escala em decibel. A escala linear de pressão sonora de extensos valores é convertida numa escala mais manejável desde o *limiar da audição* (20 μPa), correspondente a 0 dB, até ao *limiar da dor* (cerca 100 Pa), referente a 134 dB, nas escalas lineares e logarítmicas, respetivamente.

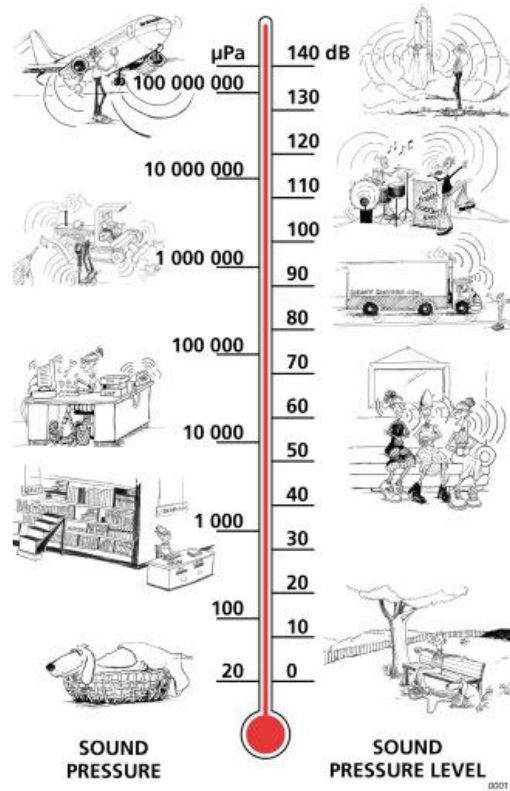


Fig. 3 - Escala linear de pressão sonora p em μPa e escala logarítmica de nível de pressão sonora, L_p , em dB, para alguns sons comuns e para uma pressão sonora de referência de 20 μPa [7].

Quando um dado recetor está sujeito a níveis de pressão sonora provenientes de várias fontes, L_i , estes devem ser somados, como se mostra na equação 3.

$$L_{soma} = 10 \times \log_{10} \left(\sum_{i=1}^N 10^{\frac{L_i}{10}} \right) \quad (3)$$

Aproximadamente, a soma de dois níveis de pressão sonora iguais é igual ao valor do respetivo nível de pressão sonora mais 3 dB. Para níveis de pressão sonora diferentes, se a diferença entre níveis for superior em pelo menos 10 dB, a soma será, aproximadamente igual ao maior dos níveis de pressão sonora.

Além da pressão sonora, a *intensidade* e a *potência* sonora são outras grandezas que importa conhecer.

As fontes de ruído emitem uma dada potência sonora, W , que é uma característica exclusiva da mesma e representa a energia total que, num segundo, atravessa uma esfera fictícia centrada na fonte de raio qualquer, quantificando-se em watt (W) [8].

Outra forma de caracterizar um fenómeno sonoro é através do nível de potência sonora, L_w , também medido em dB, dado pela equação 4:

$$L_W = 10 \times \log_{10} \left(\frac{W}{W_0} \right) \quad (4)$$

Onde, L_W designa o nível de potência sonora da fonte em decibel (dB);
 W a potência sonora em W;
 W_0 a potência sonora de referência (10^{-12} W).

A potência sonora relaciona-se com a pressão sonora, p e com a intensidade sonora, I , características do estímulo criado pela fonte sonora.

A intensidade sonora é, numa dada direção, a quantidade média de energia que atravessa uma área de 1 m^2 , num segundo, numa normal a essa direção, quantificando-se em W/m^2 .

A equação 5 relaciona a intensidade sonora com a potência sonora e a pressão sonora.

$$I = \frac{W}{4\pi r^2} = \frac{p^2}{\rho c} \quad (5)$$

Onde, r é a distância (m);
 ρ a massa volúmica do ar ($\approx 1,2 \text{ kg/m}^3$);
 c a celeridade (velocidade de propagação do som no ar a $20^\circ\text{C} \approx 340 \text{ m/s}$).

2.2.3. FREQUÊNCIA, BANDAS DE FREQUÊNCIA E FONE

Já se mencionou que a audição de um som implica variações de pressão, sendo esta uma das suas principais características. O número de variações de pressão por segundo é designado de *frequência*, cuja unidade de medida é o hertz (Hz) [7].

Para um ser humano jovem e saudável a audição normal abrange, aproximadamente, um intervalo de frequências entre os 20 Hz e os 20.000 Hz. Sons com frequências abaixo dos 20 Hz (frequências graves) denominam-se *Infrassons* e os que apresentam frequências acima dos 20.000 Hz (frequências agudas) designam-se por *ultrassons*. Os *infrassons* e os *ultrassons* não são detetados pelo ouvido humano.

Quase todos os ruídos são complexos ou compostos e contêm diferentes frequências, por oposição aos *sons puros* que apenas contêm uma componente, em termos de frequência.

De forma a facilitar a análise em frequência e uma vez que o ouvido humano é incapaz de detetar cada frequência individualmente, utilizam-se bandas de frequência com dimensão normalizada. Estas correspondem a agrupamentos de diversas frequências em torno de uma frequência central que lhe dá o nome, um limite inferior, um limite superior e uma dada largura correspondente à diferença entre esses dois limites. Existem bandas de diversas larguras, sendo as mais usadas e com interesse para a acústica ambiental, as bandas de 1/1 oitava e de 1/3 oitava.

A caracterização de qualquer ruído só pode ser adequadamente realizada se usados os domínios de análise em pressão e frequência. Na Fig. 4, representa-se o exemplo de um espectro sonoro.

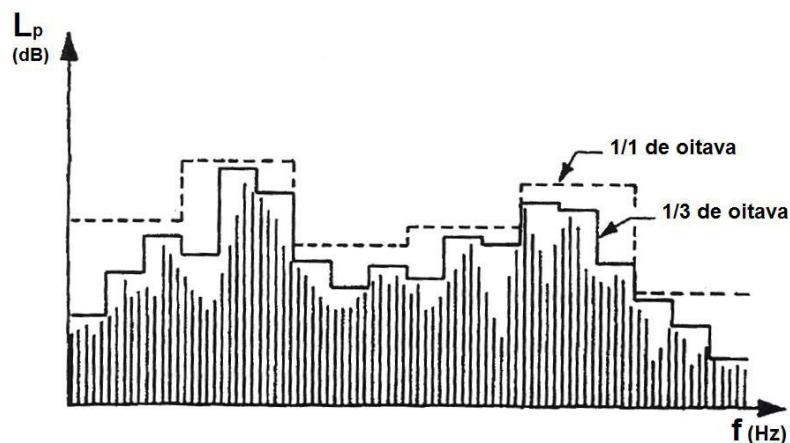


Fig. 4 - Espectro sonoro de um mesmo ruído dividido em bandas de 1/1 oitava e 1/3 oitava [8].

No entanto, a sensibilidade do sistema auditivo humano além de variar significativamente com a frequência, depende também da intensidade sonora do próprio som. O ouvido humano é menos sensível às baixas frequências que às médias e altas frequências como se pode comprovar pela observação da Fig. 5, onde se representa e introduz um novo conceito - o Fone. O Fone é a unidade com que são numericamente escalonadas as curvas de igual percepção subjetiva. Cada linha de n fone representa os pontos de igual sensação sonora para diferentes níveis de pressão e frequência. A curva inferior representa o *limiar da percepção do som*, ou seja, 0 fone.

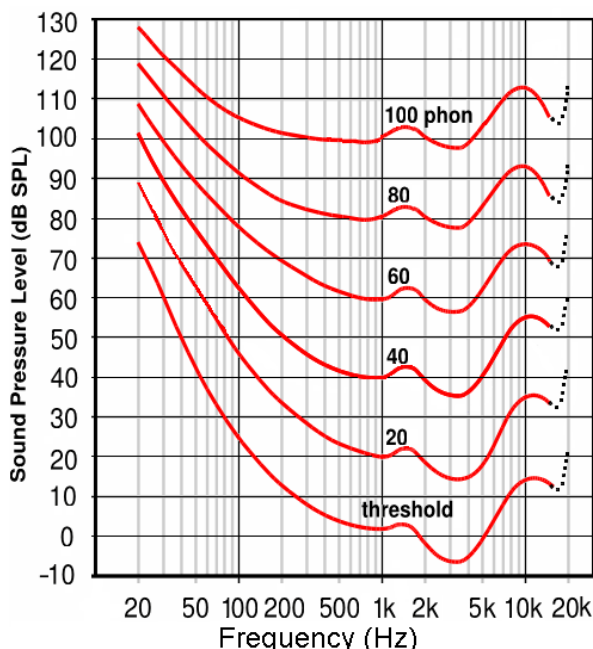


Fig. 5 - Curvas de igual sensibilidade auditiva (em fone) [9].

Considerando a variação de sensibilidade aos estímulos sonoros com a frequência e intensidade e de forma a simular a resposta logarítmica do ouvido humano em relação às variações de pressão sonora, são usualmente aplicadas curvas de ponderação ou filtros. A curva de ponderação mais

usada corresponde ao filtro do tipo A, uma vez que é o filtro que melhor relaciona a resposta subjetiva ao ruído com os estímulos mais usuais. A aplicação desta curva dá origem aos níveis sonoros em dB(A) e os valores que lhe estão associados, para a banda de frequência de 1/1 de oitava estão indicados no Quadro 1.

Quadro 1 - Valores centrais das bandas de frequência de 1/1 oitava e correspondentes valores numéricos das ponderações da curva A, na gama audível [8].

Banda de Frequência (Hz)	Ponderação A para 1/1 oitava (dB)
31	-40
63	-26
125	-15,5
250	-8,5
500	-3
1000	0
2000	+1
4000	+1
8000	-1
16000	-7

Na Fig. 6, estão representadas as curvas de ponderação A e C.

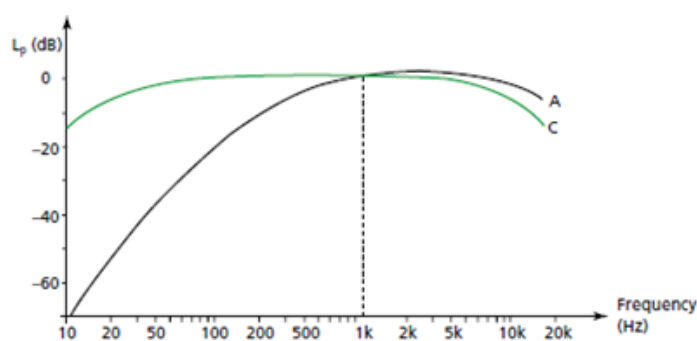


Fig. 6 - Curvas de ponderação A e C [7].

2.2.4. ANÁLISE NO TEMPO

Os ruídos apresentam uma grande variabilidade temporal, ao longo da qual existem flutuações no nível de pressão sonora. Desta forma é necessário recorrer a descritores ou parâmetros estatísticos e/ou energéticos para avaliar, num dado intervalo de tempo, um determinado acontecimento acústico.

Um parâmetro descritor energético é o “*nível de pressão sonora contínuo equivalente*” L_{eq} que se define como o nível de pressão sonora que, se atuasse de forma constante num dado intervalo de tempo (T), produziria a mesma energia que o som que se pretende avaliar [8]. Este parâmetro pode ser calculado através das equações 6 e 7.

$$L_{eq} = 10 \times \log \frac{1}{T} \int_0^T \left(\frac{p(t)}{p_0} \right)^2 dt \quad (6)$$

$$L_{eq} = 10 \times \log \left[\left(\frac{1}{T} \right) \sum_{i=1}^N t_i \times 10^{\frac{L_i}{10}} \right] \quad (7)$$

Onde, L_i é o nível de pressão sonora uniforme de um determinado som (dB) durante um dado período de tempo t_i ;
 $T = \sum t_i$.

Já os parâmetros estatísticos estão associados a quantis de densidade de probabilidade de ocorrência. Assim, L_N define-se como sendo o nível de pressão sonora que, num dado intervalo de tempo, é excedido em N% da duração desse intervalo de tempo [8].

Os parâmetros estatísticos desapareceram da legislação portuguesa com a aprovação do Regime Legal sobre a Poluição Sonora, em 2000 [10], mas ainda existem em diversos documentos de legislação internacional parâmetros como o L_5 , L_{10} , L_{90} ou L_{95} , que também são muitas vezes utilizados para se tentar perceber o tipo de estímulos em presença numa dada avaliação sonora. Na Fig. 7, encontram-se representados os parâmetros acústicos L_{eq} , L_{50} e L_{95} .

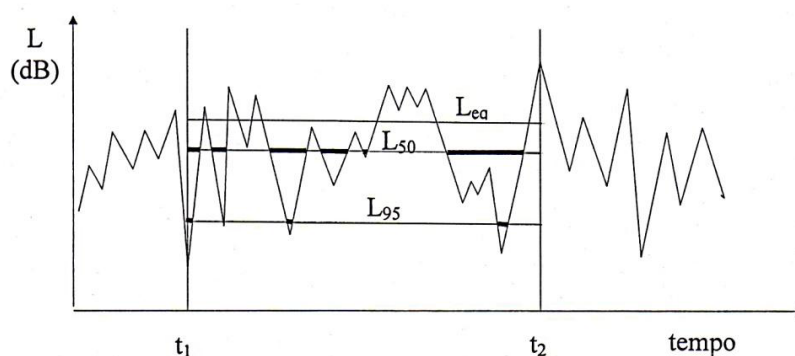


Fig. 7 - Diferenças entre os parâmetros acústicos L_{eq} , L_{50} e L_{95} [8].

2.3. RUÍDO E SUA PROPAGAÇÃO

2.3.1. TIPOS DE RUÍDO

O conhecimento do tipo de ruído a avaliar é necessário, para que se possam escolher os parâmetros acústicos a medir, o equipamento mais adequado a usar, bem como a duração e a oportunidade da medição.

Por exemplo, atendendo à sua duração, os ruídos podem ser contínuos; intermitentes; impulsivos; quanto à frequência podem ser tonais ou apresentar uma forte componente de baixas frequências.

O *ruído contínuo* pode ser produzido por máquinas ou instalações industriais que operam sem interrupção, o *ruído intermitente* pode provir de maquinaria que opera em ciclos ou quando, por exemplo, veículos isolados ou aviões que passam e o nível sonoro vai aumentando e diminuindo ao longo do tempo [7].

O *ruído intermitente* pode ser definido como o ruído observável apenas durante certos períodos de tempo, em intervalos regulares ou irregulares, em que a duração de cada uma das ocorrências é superior a 5 s [11]. Na Fig. 8, apresentam-se dois exemplos de ruídos intermitentes e exemplos dos respetivos espectros sonoros com a variação do nível de pressão sonora nas ordenadas em função do tempo nas abcissas.

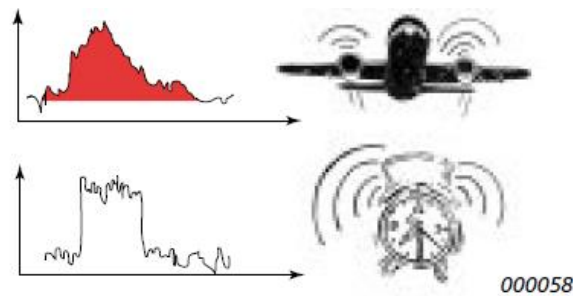


Fig. 8 – Ruído intermitente [7].

O *ruído impulsivo* é caracterizado por curtos impulsos de pressão sonora [11] e resulta de impactos ou explosões, é breve e abrupto [7]. Na Fig. 9, pode-se observar um exemplo de um ruído deste tipo e o respetivo espectro sonoro com a variação do nível de pressão sonora nas ordenadas em função do tempo nas abcissas.

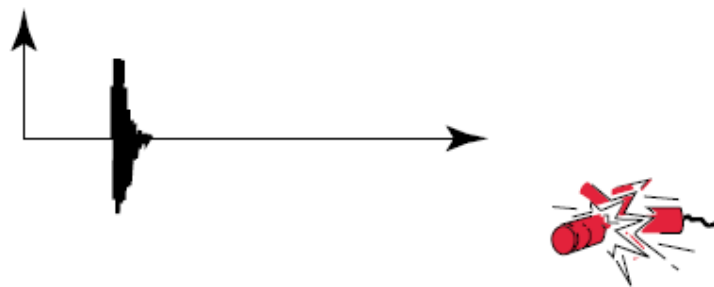


Fig. 9 – Ruído Impulsivo [7].

No que diz respeito a *ruídos com uma forte componente nas baixas frequências*, como o nome indica, apresentam valores apreciáveis de nível de pressão sonora entre 8 Hz e 100 ou 125 Hz, sendo um tipo de ruído difícil de mascarar que se espalha facilmente em todas as direções e pode ser ouvido a grandes distâncias. Podem-se ainda referir os *infrassons* que apresentam um espectro sonoro com componentes de frequência abaixo dos 20 Hz e que são percebidos, não como som, mas como pressão [7].

O *ruído tonal* é caracterizado por uma única componente de frequência ou por componentes de banda estreita que emergem de modo audível do ruído global [11]. Estes podem ser criados, por exemplo, por maquinaria com partes rotacionais como motores, caixas de engrenagem, ventiladores ou sistemas de bombagem. Impactos instáveis ou repetidos causam vibrações que,

transmitidas através das superfícies para o ar, podem ser audíveis como sons tonais. Este tipo de som pode ser identificado subjetivamente, apenas pelo ouvido ou, objetivamente, analisando o espectro sonoro, como se exemplifica na Fig. 10 [7].

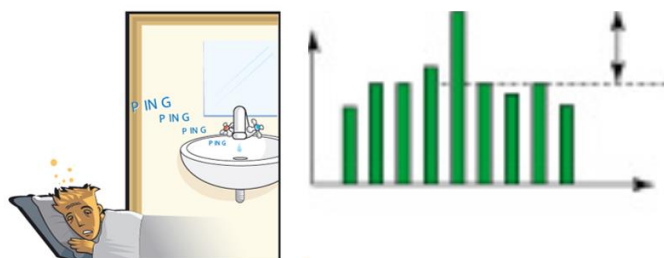


Fig. 10 – Ruído tonal [11] [7].

Além dos tipos de ruído previamente identificados, a Norma NP ISO 1996-1:2011 [11] define ainda os seguintes tipos de sons:

- *Som total* – Som global existente numa dada situação e num dado instante, usualmente composto pelo som resultante de várias fontes, próximas e distantes. O som total equivale ao ruído ambiente no Regulamento Geral do Ruído [12].
- *Som específico* – Componente do som total que pode ser especificamente identificada e que está associada a uma determinada fonte. Corresponde ao ruído particular do Regulamento Geral do Ruído.
- *Som residual* - Som remanescente numa dada posição e numa dada situação quando são suprimidos os sons específicos ou particulares em consideração. Corresponde ao ruído residual do Regulamento Geral do Ruído.
- *Som inicial* – Som total existente numa situação inicial antes da ocorrência de qualquer modificação.
- *Som flutuante* – Som contínuo cujo nível de pressão sonora, durante o período de observação, varia significativamente mas que não pode ser considerado um som impulsivo.
- *Emergência sonora* – Incremento do som total existente numa dada situação resultante da ocorrência de um som específico.

2.3.2. TIPOS DE FONTES SONORAS

Uma fonte de ruído é definida como a ação, a atividade permanente ou temporária, o equipamento, a estrutura ou infraestrutura que produza ruído nocivo ou incomodativo para quem habite ou permaneça em locais onde se faça sentir o seu efeito [13].

Previamente já se referiu que a caracterização das fontes de ruído está associada à respetiva potência sonora (W) emitida que, por sua vez, pode ser relacionada com a intensidade sonora (I) numa dada direção e com a pressão sonora (p) que se propaga até ao recetor.

Outro modo de classificação das fontes sonoras está relacionado com o tipo de emissão e, consequentemente, com a sua forma de propagação. Assim, as fontes sonoras podem ser pontuais ou lineares.

Uma fonte pode considerar-se *pontual* quando a dimensão da fonte em relação ao seu recetor, localizado a uma dada distância, se pode assemelhar a um ponto e *linear* quando a origem do som em relação ao recetor, localizado a uma determinada distância, se assemelha a uma linha [8]. Na Fig. 11 (a) e (b) estão representados, respetivamente, exemplos de uma fonte pontual e de uma fonte linear.

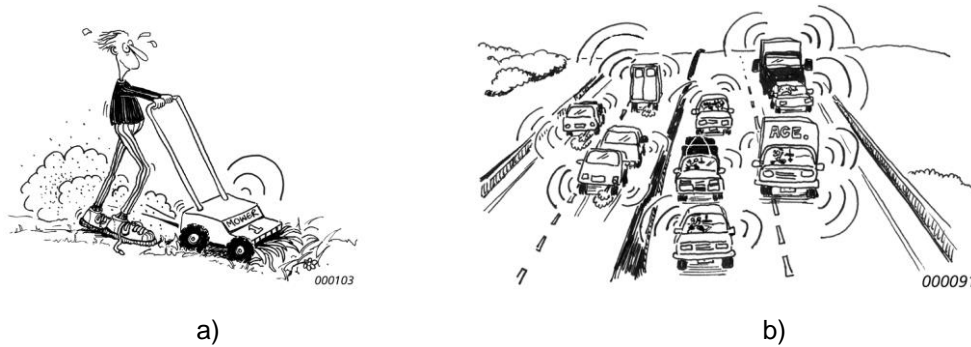


Fig. 11 - Exemplo de fonte pontual (a) e de uma fonte linear (b) [7].

2.3.3. PROPAGAÇÃO DO SOM

A propagação do som ao ar livre é influenciada por diversos fatores que contribuem para a sua atenuação, entre os quais se encontra o tipo de fonte sonora que se acabou de enunciar. Assim, o nível de pressão sonora num dado recetor é consequência direta do tipo de fonte sonora em presença, do respetivo nível de potência sonora e da atenuação total verificada ao longo de todo o percurso entre o emissor e o recetor [8].

No percurso de propagação do som, os efeitos que se fazem sentir e que passarão a ser descritos são a divergência geométrica, a atenuação pela absorção do ar, o gradiente térmico, a influência do vento, o efeito do solo e a presença de obstáculos.

O fator mais importante que intervém nesta atenuação é a *divergência geométrica*, que se deve ao facto de a superfície da onda sonora aumentar com a distância à fonte.

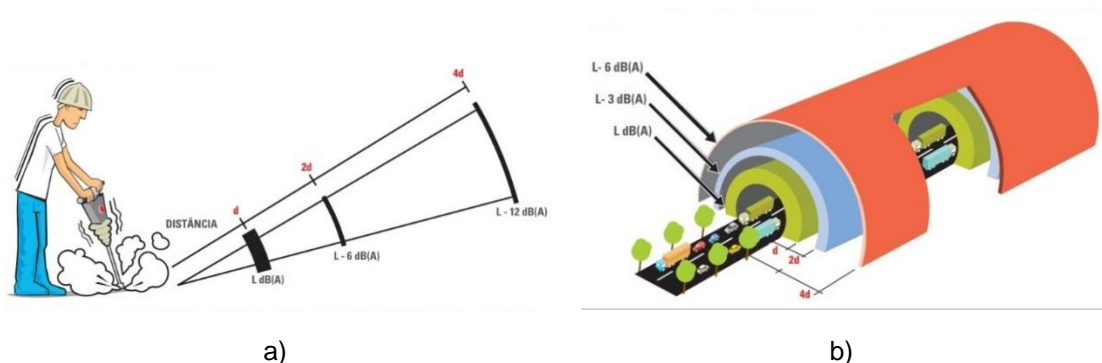


Fig. 12 - Exemplo de uma fonte pontual (a) e de uma fonte linear (b) posicionadas junto ao solo [14].

Nas fontes pontuais, esta superfície de propagação é esférica e, quando estas fontes se localizam próximas do solo, a energia emitida propaga-se segundo um semi-hemisfério diminuindo o nível de pressão sonora L_p cerca de 6 dB sempre que a distância à fonte duplica. No caso de fontes lineares, a superfície de propagação é cilíndrica e, no caso da onda sonora se propagar junto ao solo, tal ocorrerá segundo um semi-tronco cilíndrico, ao qual corresponderá uma diminuição do nível de pressão sonora de, aproximadamente, 3 dB quando a distância à fonte duplica, como se pode observar na Fig. 12 (b) [13].

A *atenuação pela absorção do ar* é outro fator de atenuação de ruído que depende da distância à fonte, da frequência do ruído e das condições ambientais (temperatura, humidade relativa e pressão atmosférica). O coeficiente de atenuação atmosférica, em dB, pode ser retirado de diagramas e tabelas que relacionam estas características, como o diagrama representado na Fig. 13.

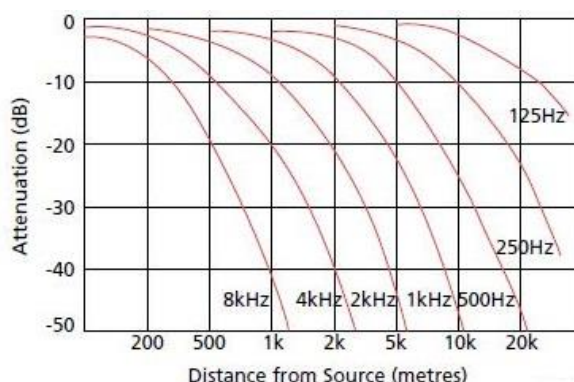


Fig. 13 – Atenuação pela absorção do ar em função da frequência e da distância à fonte [7].

Como a celeridade ou velocidade de propagação das ondas sonoras varia com a temperatura e esta exibe um perfil com variação por altitude em relação ao solo, as ondas sonoras apresentam velocidades diferentes em altura, o que provoca o encurvamento destas.

O *gradiente térmico* é positivo quando a temperatura aumenta em altura e negativo quando esta diminui em altura. O gradiente de temperaturas negativo resulta na redução do nível sonoro junto ao solo e o gradiente de temperaturas positivo resulta em ondas sonoras que sofrem difração para baixo, provocando um aumento do nível sonoro junto ao solo, como se pode verificar na Fig. 14.

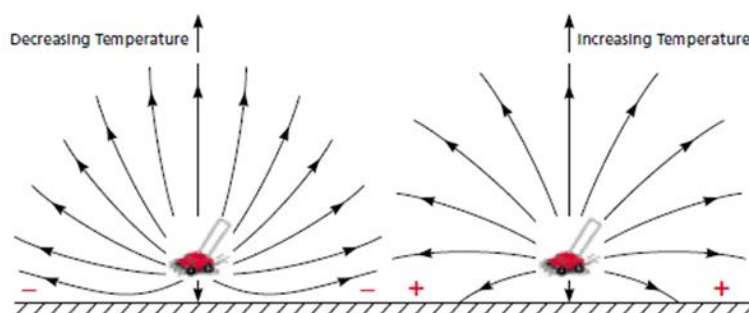


Fig. 14 - Gradientes de temperatura [7].

Quanto à *influência do vento* na propagação das ondas sonoras, tal efeito faz-se sentir, por exemplo, com a velocidade do vento que aumenta geralmente com altitude. Quando o vento sopra da fonte sonora para o recetor encurva as ondas para baixo (inversão térmica), resultando num aumento do nível sonoro junto ao solo. Se o vento soprar do recetor para a fonte sonora, há encurvamento das ondas para cima, conduzindo à redução do nível sonoro junto ao solo, como se observa na Fig. 15 [8].

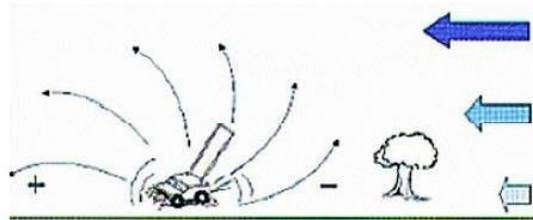


Fig. 15 - Efeito da variação da velocidade do vento com a altura na direção do recetor para a fonte [7].

Estes dois últimos efeitos só têm significado para distâncias superiores a 100 m e podem fazer variar os níveis de pressão sonora entre -7 dB e +12 dB.

A propagação do som junto ao solo é afetada pela atenuação causada pelo “atrito” nessa superfície. O *efeito do solo* é diferente para diferentes tipos de superfície. Pode considerar-se aproximadamente e para pequenas distâncias que um terreno “rígido” como, por exemplo, betão ou água líquida, pode aumentar em 3 dB o nível de pressão sonora, enquanto um terreno “macio” como relva ou neve, por exemplo, pode dificultar a propagação reduzindo o nível de propagação sonora de 1 dB a 6 dB [8].

A *presença de obstáculos* foi outro dos fatores mencionados como influenciador da propagação das ondas sonoras. A reflexão nas superfícies exteriores aumenta o nível de pressão sonora. Quando as ondas sonoras colidem com uma superfície, uma parte da sua energia acústica é refletida por ela, outra parte é transmitida através da superfície e outra é absorvida pela própria superfície [7].

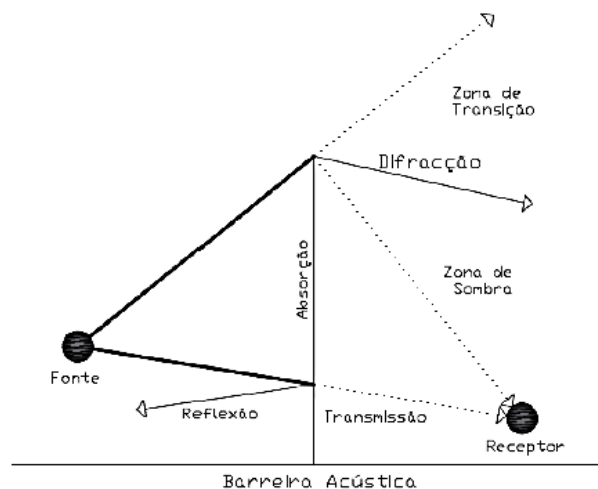


Fig. 16 - Fenómenos de absorção, transmissão, reflexão e difração numa barreira acústica [13].

Como exemplo, podem-se salientar as barreiras acústicas que são elementos construídos na envolvente de uma fonte sonora para criar uma zona mais calma na parte posterior. São elementos construtivos que reduzem o nível sonoro entre a fonte emissora e o recetor através de fenómenos de absorção, transmissão, reflexão e difração como se mostra na Fig. 16 [13].

O fenómeno de difração à volta da barreira pode ocorrer pela parte superior ou pelos contornos laterais das extremidades verticais.

No entanto, a colocação da barreira acústica também pode ter efeitos prejudiciais, uma vez que pode fazer aumentar o nível sonoro no lado oposto ao da sua colocação por reflexões. Deve-se ter em conta os seguintes fatores na escolha de uma barreira [13].

- A distância entre a estrada e a barreira, entre a barreira e o recetor e a altura da barreira;
- A intensidade e espetro do som a atenuar;
- As condições atmosféricas (regime de ventos e inversão térmica);
- Propriedades de absorção da barreira;
- Peso por m² de barreira (massa/m² mínima recomendada de 10 kg/m²);
- A forma da barreira;
- A posição relativa da fonte emissora de ruído.

Outros fatores com influência na propagação do som são as atenuações devidas à existência de vegetação densa, a propagação em zonas industriais e edificadas e a ação do nevoeiro e da chuva.

A atenuação do som na sua propagação ao ar livre pode ser calculada através da norma portuguesa NP 4361 “*Atenuação do som na sua propagação ao ar livre*” [15].

2.4. INCOMODIDADE SONORA

O ruído ambiente pode afetar a saúde e a qualidade de vida das pessoas, interferindo com atividades básicas como dormir, descansar, estudar ou comunicar. Em geral, os efeitos do ruído na saúde humana podem agrupar-se em:

- Efeitos físicos - Alterações nas propriedades físicas do sistema auditivo (perdas auditivas). As perdas auditivas podem ser temporárias ou permanentes.
- Efeitos fisiológicos – Alterações na atividade do corpo humano, alterações de pressão sanguínea, do ritmo cardíaco e respiratório e tensões musculares.
- Efeitos psicológicos – Alterações no comportamento como, por exemplo, irritabilidade, *stress*, fadiga ou diminuição da capacidade de concentração.

Os impactes ambientais do ruído são aumentados quando interagem com outros problemas ambientais, como a poluição do ar ou uso de substâncias químicas, como é o caso de áreas urbanas, onde a maior parte destes problemas ambientais existe. São várias as fontes de ruído, em meio urbano, que podem estar na origem da sensação de incomodidade: vias rodoviárias e ferroviárias, tráfego aéreo, indústria, obras de construção civil, os trabalhos exteriores, a própria vizinhança e, mais recentemente, aerogeradores de pequena dimensão. Em meio urbano, os níveis de pressão sonora não são suscetíveis de deteriorar o sistema auditivo humano mas podem causar efeitos não auditivos na saúde das pessoas expostas, que se traduzem nas perturbações psicológicas ou fisiológicas já mencionadas.

Segundo a *Organização Mundial de Saúde*, OMS, o ruído emergiu como um dos principais problemas ambientais na Europa e as reclamações públicas, sobre excesso de ruído são cada vez

mais frequentes. Tal não surpreenderá uma vez que cerca de 75% da população europeia vive em cidades [16] e as análises nacionais mostram que o nível de ruído ambiente tem vindo a aumentar na maior parte dos países europeus.

Apesar de os dados sobre a exposição ao ruído serem relativamente pobres, quando comparados com os dados relativos a outros problemas ambientais, em 1996 foi publicado um estudo sobre o ruído na União Europeia: *O Livro Verde da UE - Futura Política de Ruído* [17], que referia que cerca de 20% da população da União Europeia, aproximadamente 80 milhões de pessoas, sofriam problemas devido à sua exposição a níveis de ruído considerados inaceitáveis por cientistas e profissionais de saúde. Além disto, 170 milhões de cidadãos vivem nas designadas “zonas cinzentas”, onde os níveis de ruído são suscetíveis de causar séria incomodidade durante o dia e estavam expostos a níveis de ruído compreendidos entre 55 e 65 dB(A), valor que não deve ser excedido de forma a evitar incomodidade séria, de acordo com as recomendações da OMS [18].

Mais recentemente, em 2011, as cartas de ruído elaboradas na Europa publicadas no *Relatório relativo à aplicação da Diretiva Ruído Ambiente* [19], no âmbito da diretiva 2002/49/EC [20], relativa à avaliação e gestão do ruído ambiental, mostram que aproximadamente 67 milhões de pessoas, que vivem em aglomerados urbanos, com mais de 250 000 de habitantes estão expostas a níveis de ruído diários que excedem 55 dB(A), ou seja, um valor do indicador de ruído diurno-entardecer-noturno (L_{den}) superior a 55 dB(A), sendo que no período noturno, 47 milhões de pessoas estão expostas a níveis de ruído superiores a 50 dB(A) ($L_n > 50$ dB(A)), quando as orientações da OMS relativas a ruído noturno propõem um valor-guia para os níveis noturnos inferior a 40 dB(A). Fora dos aglomerados urbanos, existem ainda 34 milhões de pessoas expostas a níveis superiores a 55 dB(A) para o indicador L_{den} e 25 milhões a níveis superiores a 50 dB(A) no período noturno.

Em Portugal, foi realizado o primeiro estudo sobre ruído, o *Ruído Ambiente em Portugal* [21], de 1996, que indicava que cerca de 19% da população portuguesa estava exposta a níveis sonoros superiores a 65 dB(A), sendo a principal fonte de ruído o tráfego rodoviário, como se pode observar na Fig. 17.

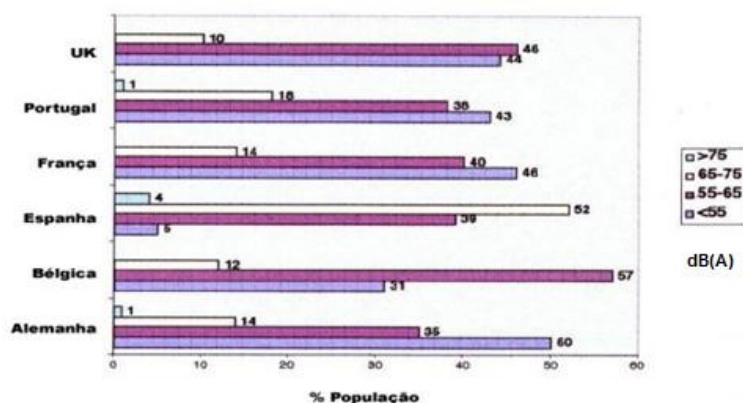


Fig. 17 - Exposição ao ruído em países da União Europeia em 1996 [21],

Em 2012, de acordo com a informação constante do Relatório do Estado do Ambiente, o tráfego rodoviário continuava a ser a principal fonte de ruído e, aproximadamente, 13% da população em Portugal encontrava-se exposta a níveis sonoros superiores a 65 dB(A) [22]. Na Fig. 18 pode-se

observar, em relação ao ruído proveniente das Grandes Infraestruturas de Transporte (GIT), a percentagem de população exposta a níveis sonoros considerados elevados tanto para Lisboa como para a média das grandes aglomerações europeias, isto é, municípios com uma população residente superior a 100 000 habitantes e uma densidade populacional igual ou superior a 2500 habitantes por quilómetro quadrado,

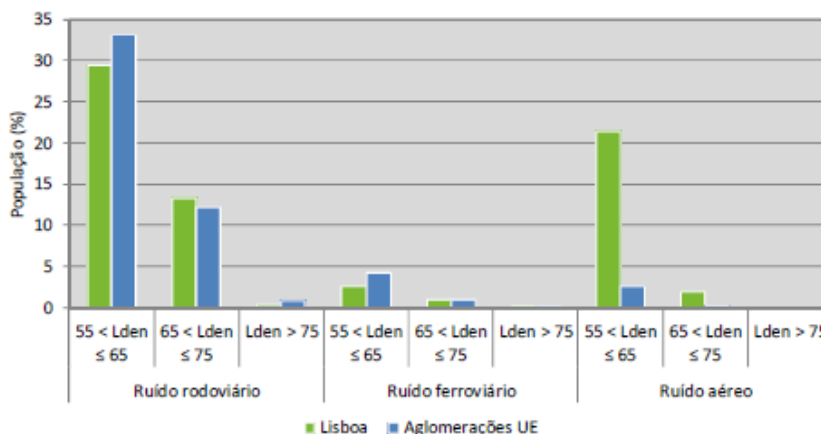


Fig. 18 - Comparação da exposição ao ruído de tráfego rodoviário, ferroviário e aéreo entre a população residente em Lisboa e nas grandes aglomerações da União Europeia [22].

A crescente exposição das pessoas a elevados níveis de ruído, bem como o aparecimento de novas fontes sonoras em meio urbano, suscetíveis de causar incomodidade, como é o caso de aerogeradores de pequena dimensão, contribui negativamente para a sua qualidade de vida, fazendo do ruído um problema de saúde pública.

A ocorrência de ruído pode resultar em incomodidade sonora para as pessoas. Como já foi referido, a definição de ruído está associada a uma sensação desagradável provocada por um dado som. Esta definição é, portanto, subjetiva e difícil de quantificar, uma vez que depende da perceção das pessoas relativamente a esse som e envolve noções subjetivas do recetor sobre intensidade, grau de aceitação e sentimento de intromissão. Surge assim o conceito de incomodidade.

A incomodidade é uma resposta subjetiva e não favorável ao ruído, que interfere com a atividade humana e com a sensação de bem-estar, podendo ser avaliada, em termos qualitativos, com base em entrevistas e reclamações.

Em Portugal, é através do Decreto-Lei n.º 9/2007, de 17 de Janeiro: Regulamento Geral do Ruído (RGR), que se aborda a avaliação da incomodidade sonora. O RGR “aplica-se às atividades ruidosas permanentes e temporárias e a outras fontes de ruído suscetíveis de causar incomodidade” e “estabelece o regime de prevenção e controlo da poluição sonora, visando a salvaguarda da saúde humana e o bem-estar das populações”. A produção de ruído é regulada através de dois critérios, o critério de exposição e o critério de incomodidade. Estes dois critérios serão abordados e aplicados na análise dos casos de estudo do presente trabalho.

3

A ENERGIA EÓLICA

3.1. INTRODUÇÃO

A energia eólica representa o aproveitamento da energia cinética contida no vento para produzir energia mecânica (a rotação das pás) que pode a seguir ser transformada em energia elétrica por um gerador elétrico. A energia eólica é uma forma de energia que tem origem no aquecimento da atmosfera pelo sol, que põe em movimento as massas de ar. A rotação da terra, a orografia, a rugosidade da superfície terrestre e os planos de água influenciam o regime dos ventos, isto é, a velocidade, direção e variabilidade do vento num dado lugar.

Hoje em dia, a energia eólica é cada vez mais utilizada para produzir eletricidade, seja para utilização local descentralizada, por exemplo, em lugares isolados, seja em grandes “parques eólicos” constituídos por vários aerogeradores ligados à rede elétrica nacional.

A reemergência do vento como uma significativa fonte de energia primária mundial é um dos desenvolvimentos mais significantes do final do século XX. De acordo com Manwell *et al.* foram vários os fatores que contribuíram para este desenvolvimento, destacando-se [23]:

- A emergente consciência da finitude das reservas terrestres de combustíveis fósseis bem como os efeitos adversos da queima desses combustíveis para produzir energia;
- A ocorrência de vento em praticamente todo o globo terrestre, e nalguns locais com considerável densidade energética. O vento foi largamente usado no passado, para gerar energia mecânica e como meio auxiliar de transporte.
- A existência de capacidade tecnológica e desenvolvimento noutros campos, que aplicados às turbinas eólicas, revolucionaram a forma como são usadas.
- A visão de uma nova forma de usar o vento e vontade política de tal acontecer. No início da reemergência do vento como fonte de energia, o custo de turbinas eólicas era muito elevado quando comparado com o custo dos combustíveis fósseis. Foi necessário apoio governamental para investigação e desenvolvimento, para aprovação de nova legislação que permitia a ligação de turbinas eólicas à rede elétrica e para oferta de incentivos, de forma a acelerar a implementação da nova tecnologia.

Mas, muito antes desta reemergência, o recurso eólico era já aproveitado, não para produzir eletricidade mas para fins mecânicos. Este aproveitamento era conseguido através dos denominados *moinhos de vento*, que transformam a energia cinética do vento em energia mecânica.

3.2. DA ANTIGUIDADE À ATUALIDADE

Em terra, os moinhos de vento são usados há pelo menos 3 000 anos, enquanto no mar, nos navios à vela o vento foi uma fonte de energia essencial durante ainda mais tempo. Desde o início do século XIII, que os moinhos de vento de eixo horizontal foram uma parte integrante da economia rural e apenas caíram em desuso com a chegada dos motores, primeiro movidos a combustíveis fósseis, mais baratos, e, mais tarde com a propagação da eletrificação rural, a eletricidade [24].

Na Europa ocidental, o uso de energia eólica em larga escala começou predominantemente em Inglaterra e na Holanda, durante a Idade Média, através dos tradicionais moinhos de vento. Estes moinhos de eixo horizontal eram construídos em madeira e usados para tarefas mecânicas como moer cereais ou bombear água. Um exemplo de um moinho de vento tradicional holandês e de um *post mill* podem ser vistos na Fig. 19.



Fig. 19 - Exemplo de um moinho de vento tradicional holandês (à esquerda) e de um *post mill* (à direita) [25].

O vento continuou a ser uma importante fonte de energia na Europa até ao período anterior à revolução industrial, mas perdeu importância logo após esse período. A razão do seu desaparecimento deve-se, principalmente, às suas desvantagens, relativamente aos combustíveis fósseis, como a não transportabilidade e o facto de ser uma fonte de energia intermitente, sendo impossível aumentar a quantidade de energia produzida.



Fig. 20 - *Smock mill* (à esquerda) e de um moinho de vento típico americano (à direita) [25].

Antes do seu desaparecimento, o moinho de vento europeu atingiu um nível alto de sofisticação ao nível do seu *design*. Nestes moinhos designados por *smock mills*, como o representado na Fig. 20 (a), a maior parte da estrutura do moinho não se movia, exceto o topo para se alinhar com o vento [23].

Enquanto os moinhos de vento europeus entravam nos seus últimos anos de vida, outra variante de moinho de vento difundiu-se largamente nos EUA. A partir do século XIX, estes moinhos com várias pás eram construídas em aço e usados maioritariamente para bombagem de água e irrigação dos terrenos. Na Fig. 20 pode-se observar um moinho de vento típico americano [23].

Quando os geradores elétricos apareceram no final do século XIX, o homem tentou fazer com que estes rodassem, introduzindo um rotor num “moinho de vento”, surgindo assim, os designados geradores eólicos, aerogeradores ou ainda turbinas eólicas. Estes sistemas aproveitam a energia cinética do vento para produzir energia mecânica que posteriormente é convertida em energia elétrica.

O uso inicial do recurso eólico para geração de eletricidade, por oposição à energia mecânica, incluiu o desenvolvimento comercial de pequenos geradores eólicos e alguma investigação e experiências usando aerogeradores de grande dimensão. Durante grande parte do século XX, a energia eólica foi usada apenas para carregamento de baterias em habitações, localizadas em áreas remotas, tendo estes sistemas de baixa potência sido rapidamente substituídos assim que o acesso à rede elétrica se tornou disponível, com o aparecimento da eletrificação rural.

Ao longo do final do século XX, os aerogeradores foram-se desenvolvendo, tornando-se maiores e mais eficientes. Em 1980, estes apresentavam, em média, uma potência útil de 30 kW e um diâmetro inferior a 15 m, como se pode observar na Fig. 21.

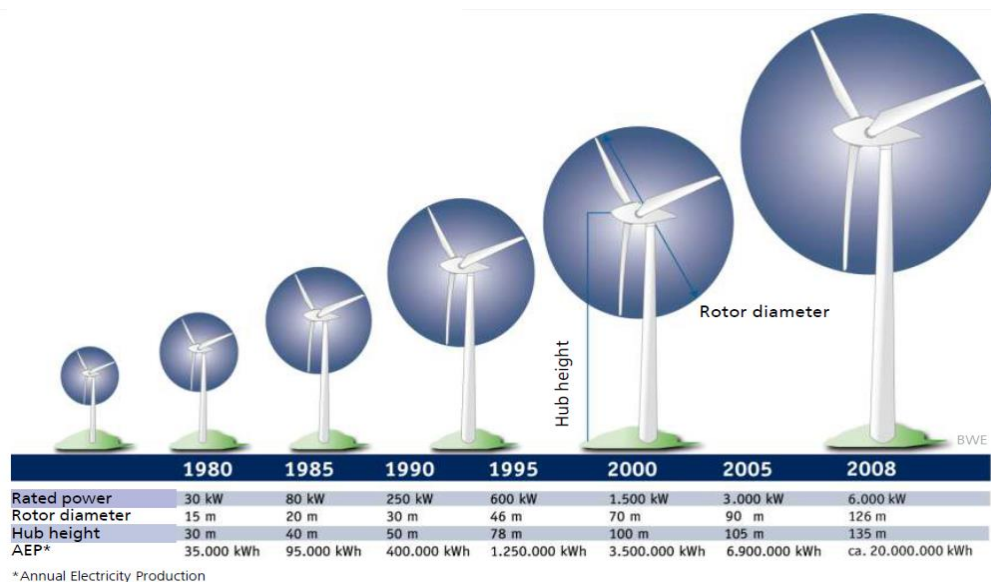


Fig. 21 - Evolução, ao longo dos anos, da dimensão de turbinas eólicas modernas [26]

A partir daí foram-se desenvolvendo aerogeradores com uma potência útil de mais de 5 MW e mais de 125 m de diâmetro. Contudo e apesar desta evolução, nos últimos anos tem-se assistido ao crescimento do interesse em aerogeradores de pequena dimensão.

Os aerogeradores de pequena dimensão têm um vasto campo de aplicação desde pequenos carregadores de baterias móveis a sistemas ligados à rede. Existe ainda um potencial pouco explorado relativo à sua aplicação em áreas rurais e em países em desenvolvimento, como sistemas de fornecimento de energia não ligados à rede e mini-redes [26].

As turbinas eólicas de pequenas dimensões diferenciam-se das grandes turbinas não só, como o nome indica, pela sua menor dimensão mas também por uma menor produção de energia e pelo seu tipo de aplicação, normalmente residencial em oposição às grandes turbinas localizadas em grandes parques eólicos, em áreas não urbanas. Apresenta-se na Fig. 22, uma turbina de pequena dimensão e outra de larga escala, bem como as respetivas potências nominais e a energia produzida por ano.

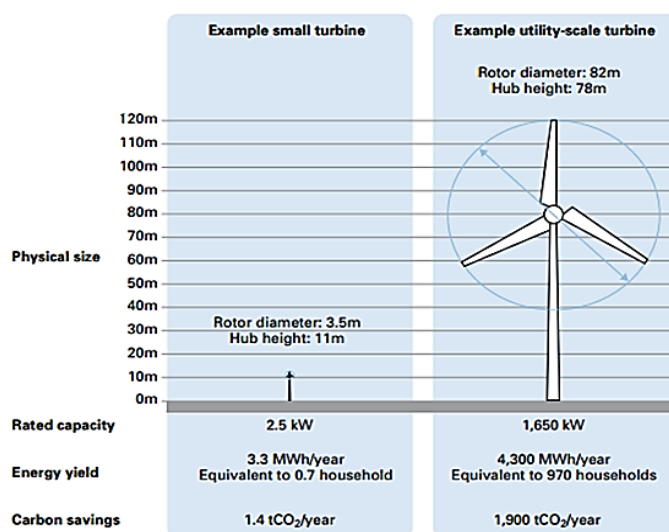


Fig. 22 - Comparação entre uma turbina de pequena dimensão e uma de larga escala [27].

Uma visão global da tecnologia relativa à energia eólica é apresentada no capítulo 4, através da descrição deste tipo de aerogeradores mais recentes.

3.3. A ENERGIA EÓLICA NO CONTEXTO DAS ENERGIAS RENOVÁVEIS

3.3.1. INTRODUÇÃO

O uso de energia tem aumentado dramaticamente, nas últimas décadas e os problemas associados ao uso excessivo de combustíveis fósseis para fins energéticos, estão a ser investigados e revelados.

Efeitos como, o aumento das temperaturas, a alteração dos padrões de precipitação, o derretimento dos glaciares e a subida do nível médio das águas do mar são uma realidade e é de esperar que estas alterações prossigam e que se tornem mais frequentes e intensas. Estes efeitos denominados por alterações climáticas têm vindo a assumir a forma de fenómenos climáticos extremos que acarretam perigos como inundações e secas. Estas alterações climáticas, induzidas pelo homem são consequência da emissão de gases com efeito de estufa para a atmosfera, cuja principal fonte, associadas à atividade humana, é a queima de combustíveis fósseis seja na

produção de eletricidade, por utilização nos transportes, na indústria e mesmo em utilizações domésticas [28].

As energias renováveis são fontes de energia primária inesgotáveis e não poluentes existentes na Natureza, que podem fazer face aos problemas supracitados, substituindo os combustíveis fósseis na produção de energia. Estas incluem a energia eólica, solar, hidroelétrica e das marés, bem como a energia geotérmica e a energia proveniente da biomassa.

A procura global de energias renováveis tem continuado a crescer, apesar da crise económica internacional, das disputas comerciais e da incerteza política, bem como da diminuição do financiamento estatal nalguns mercados-chave.

As energias renováveis forneceram energia primária para, aproximadamente, 19% do consumo global mundial de energia final em 2011, como se pode observar na Fig. 23. Deste total, cerca de 9,3% provêm da biomassa, usada regularmente para aquecimento em áreas rurais de países em vias de desenvolvimento. A energia útil para aquecimento proveniente de outras fontes renováveis representou 4,1% do uso total de energia; a hidroelétrica cerca de 3,7%, e 1,9% foram fornecidos por energia eólica, solar, geotérmica, biomassa e por biocombustíveis.

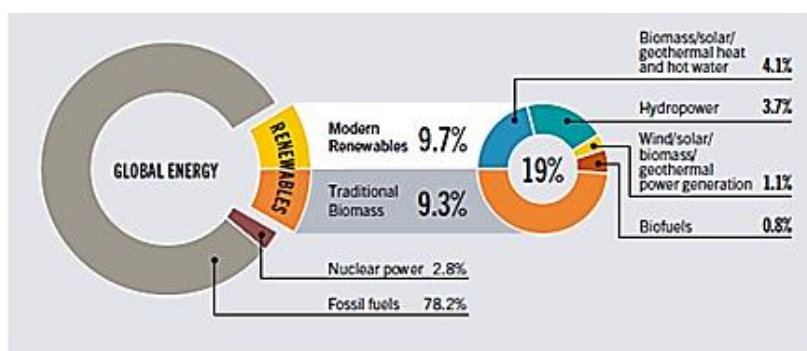


Fig. 23 - Quota de energia renovável no consumo final de energia em 2011 [29].

Esta urgência na introdução e aumento da produção de energia a partir de fontes renováveis tem um propósito - evitar que os efeitos das alterações climáticas atinjam níveis perigosos, ou seja, a comunidade internacional decidiu que o aquecimento global do planeta não deve exceder em mais de 2 ° C as temperaturas pré-industriais.

Em 2007, a União Europeia estabeleceu várias metas a atingir até 2020, conhecidas como as metas «20-20-20»:

- Redução de 20% nas emissões de gases com efeitos estufa, em relação aos níveis de 1990;
- Aumento de 20% na eficiência energética e;
- Aumento da quota de consumo de energia da UE, produzida a partir de fontes renováveis, para 20% do total de energia final consumida.

A longo prazo, será necessário proceder a reduções muito mais drásticas das emissões a nível mundial para evitar alterações climáticas perigosas. A UE está empenhada em reduzir as suas emissões em 80-95% em relação aos níveis de 1990 até 2050, desde que os países desenvolvidos participem num esforço de redução coletivo [1].

A maior utilização de energias renováveis permite à União Europeia cortar nas emissões de gases com efeito de estufa e diminuir a dependência externa de energia ou de matérias-primas para a produção da mesma, como os combustíveis fósseis. Estes podem ser substituídos por energias renováveis em quatro mercados distintos: produção de eletricidade, aquecimento e arrefecimento, combustíveis para alguns modos de transporte e serviços de fornecimento de energia em meios rurais ou como sistemas isolados não ligados à rede [29]. Para além disto, ao impulsionar a indústria de renováveis está a estimular a inovação tecnológica e o emprego na Europa.

A Diretiva 2009/28/CE, de 23 de Abril de 2009 [30], relativa à promoção da utilização de energia proveniente de fontes renováveis - Diretiva FER, definiu objetivos ambiciosos para os estados membros, de forma a que a União Europeia atinja a quota de 20% de energia produzida a partir de energias renováveis no consumo final bruto de energia da Comunidade Europeia até 2020 e uma quota de 10% de energia proveniente de fontes renováveis, especificamente, no consumo de energia setor dos transportes de cada estado-membro. De acordo com os elementos apresentados no Anexo I dessa diretiva, Portugal deveria conseguir uma quota de energia proveniente de fontes renováveis no consumo final bruto de energia, em 2020, correspondente a 31%.

No seguimento desta Diretiva, que obriga cada Estado-Membro a aprovar e notificar a Comissão um plano nacional de ação para as energias renováveis, foi elaborado o primeiro plano nacional de ação para as energias renováveis em Portugal, aprovado em 30 de Julho de 2010, tomando a designação PNAER2010.

Na Fig. 24, podem observar-se as quotas de energia proveniente de fontes renováveis no consumo total de energia, nos anos de 2011 e 2005 e a quota que se pretende atingir em 2020 [29].

Da análise desta figura verifica-se que tem ocorrido algum sucesso com as políticas implementadas a nível dos diversos Estados-Membros, já se tendo alcançado 13% dos 20% pretendidos de contribuição média das fontes renováveis.

Aliás, existem países que atualmente já atingiram as metas pretendidas para 2020, nomeadamente, a Roménia, Estónia, e outros que estão próximo como a Suécia, Finlândia, Portugal, Espanha, entre outros.

As metas relativas às energias renováveis podem assumir várias formas, para além das quotas de energia de fontes renováveis relativamente à energia final, sendo a mais comum, o aumento da contribuição das fontes renováveis na produção de energia elétrica.

Na Fig. 25, podem observar-se os países da EU com mais peso de fontes renováveis na produção de energia elétrica. Outras metas incluem quotas de energia proveniente de fontes renováveis relativamente à energia primária, ao fornecimento de calor e de combustíveis para os diferentes meios de transporte, bem como, a capacidade de instalação e/ou operação de tecnologias renováveis.

As fontes de energia renováveis contribuem cada vez mais para a produção de eletricidade na EU, registando em 2012 um aumento de 28.8% relativamente a 1999. A energia eólica e hídrica são as fontes de energia que mais contribuem para esta produção.

Em 2012, cerca de 24,1% da produção de energia elétrica na União Europeia (UE15) foi proveniente de fontes renováveis de energia.

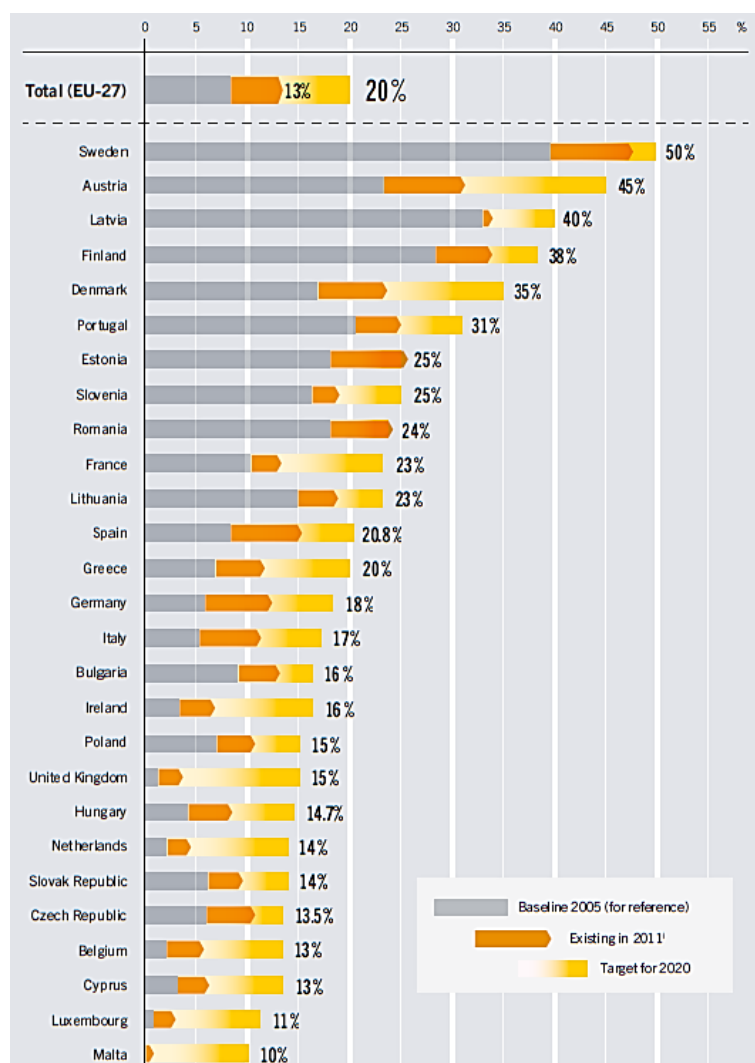


Fig. 24 – Quota de energia de fontes renováveis no consumo final de energia em 2005, 2011 e metas para 2020 [29].

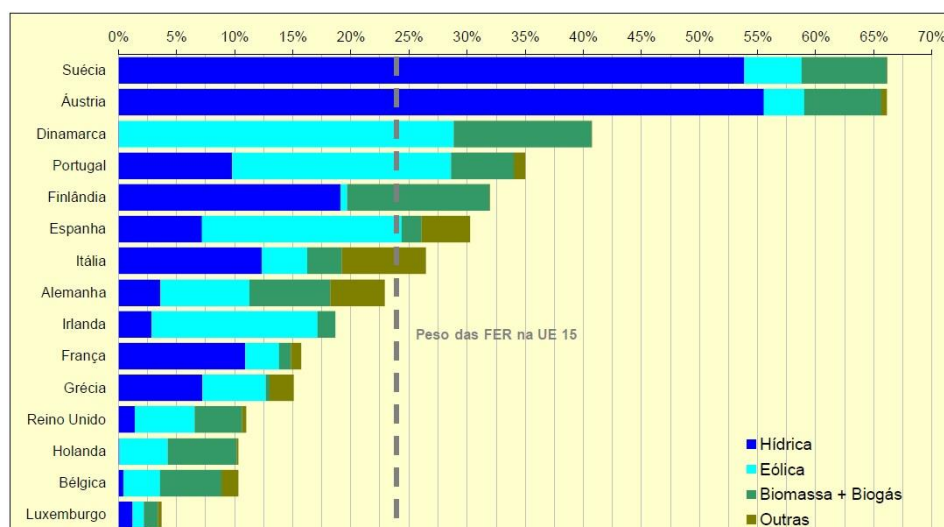


Fig. 25 - Peso da produção de energia elétrica a partir de energia proveniente de fontes renováveis na produção bruta + saldo importador, em 2012 [31]

A Suécia e a Áustria lideraram o setor elétrico de energias renováveis na EU15, apresentando ambos os países a maior incorporação de fontes renováveis na produção bruta de energia elétrica, cerca de 66,1%, devidos sobretudo à hídrica que apresentou, em 2012, uma quota de 53,9% e 55,6%, respetivamente, na produção total de energia elétrica destes países.

Segue-se a Dinamarca, com uma quota de fontes renováveis de 40,7% na produção de eletricidade e que ultrapassa estes dois países no que toca à quota de energia eólica, 28,8%, o maior valor registado na EU15, em 2012. A Dinamarca apresenta ainda a segunda maior cota de incorporação de Biomassa e Biogás a seguir à Finlândia.

Em Portugal, as fontes renováveis de energia contribuíram com cerca de 35% para a produção total de energia elétrica do país, colocando-o no quarto lugar da lista de países da União Europeia (UE15) com maior incorporação de energias renováveis, seguido da Finlândia, Espanha entre outros.

Em 2013, tendo sido identificado um excesso de oferta de produção de eletricidade decorrente de uma redução da procura, considerou-se necessário reformular o PNAER2010, tendo sido aprovado pela Resolução do Conselho de Ministros n.º 20/2013, de 28 de fevereiro de 2013, o novo PNAER2020 [32]. O PNAER2020 tem como objetivo rever o peso relativo de cada uma das FER no *mix energético* nacional e bem como as metas de incorporação a atingir em 2020, de acordo não só com o seu custo de produção, mas com o seu potencial de funcionamento em regime de mercado livre, embora respeitando sempre os compromissos assumidos por Portugal em matéria de energias renováveis, nos termos previstos da Diretiva 2009/27/CE.

No que respeita às energias renováveis, o PNAER2020, prevê uma redução de 18% na capacidade instalada em tecnologias baseadas em FER, face ao de 2010, embora com uma quota de eletricidade proveniente de fontes renováveis superior (60% vs. 55%), tal como a meta global a alcançar, que deverá situar-se em cerca de 35% (face à anterior meta de 31%). Estas novas linhas gerais têm como base a premissa de que Portugal deve ser um país energeticamente eficiente e independente, ou seja, um país competitivo. O PNAER2020 estabelece a introdução de FER nos setores de Aquecimento e arrefecimento, Eletricidade e Transportes.

3.3.2. ENERGIAS RENOVÁVEIS EM PORTUGAL

Portugal é um país com escassos recursos energéticos endógenos, nomeadamente, aqueles que asseguram a generalidade das necessidades energéticas da maioria dos países desenvolvidos (como o petróleo, o carvão e o gás).

Segundo a DGEG - Direção Geral de Energia e Geologia, em 2011 o contributo das energias renováveis no consumo total de energia primária foi de 22,8% contra 23,4% em 2010 e a dependência de Portugal em termos de importação de energia foi de 79%, nomeadamente, no que se refere às importações de fontes primárias de origem fóssil. Importa assim aumentar a contribuição das energias renováveis: hídrica, eólica, solar, geotérmica e biomassa, nas quais Portugal pode ser um bom contribuinte [33].

A diretiva 2009/29/CE de 23 de Abril [30], para além de fixar objetivos nacionais para a quota de energia proveniente de fontes de energia renováveis no consumo final bruto de energia, estabelece também a metodologia de contabilização da eletricidade produzida a partir da energia hídrica e eólica.

Em Portugal, em 2012, o consumo de energia elétrica totalizou 49,1 TWh, contraindo 3,6% face ao ano anterior. A produção de energia com origem em fontes renováveis permitiu abastecer 37% do consumo, com a energia eólica a atingir a quota mais elevada de sempre, cerca de 20% da produção total de eletricidade foi satisfeita a partir da energia eólica.



Fig. 26 - Repartição da produção de energia elétrica, em Portugal e por fonte de energia, em 2011 e 2012 [34].

Como se pode observar na Fig. 26, 2012 foi um ano com uma redução acentuada na quantidade de energia produzida a partir de energia hidráulica, tal dever-se-á ao facto de ter sido um ano excecional com reduzida pluviosidade.

No final de novembro de 2013, Portugal Continental tinha cerca de 11.066 MW de capacidade instalada para produção de energia elétrica a partir de fontes renováveis. A produção a partir de FER cresceu 57% (de 17,5 TWh para 27,5 TWh), nos onze meses de 2013, quando comparada com o período homólogo de 2012. Neste período a participação da energia hídrica cresceu 154%, sendo assegurada, em cerca de 2/3, no Norte de Portugal [31].

Na Fig. 27, pode observar-se a evolução da energia produzida a partir de fontes renováveis, desde 2005, assistindo-se a uma grande flutuação na comparticipação da energia hídrica, fruto essencialmente das grandes alterações verificadas nas condições climatéricas, e um crescimento consistente e progressivo da potência eólica instalada, ao longo dos últimos anos, corroborado pela informação apresentada na Fig. 28.

A Fig. 28 representa a evolução do peso da produção das energias renováveis na produção bruta de energia a partir de fontes renováveis ao longo dos anos, caracterizada por acentuadas flutuações que acompanham as flutuações da grande hídrica, que apresenta a maior quota de renováveis do

país. A produção de energia a partir de fontes renováveis continua a aumentar, atingindo desde 2009 valores superiores a 1/3 da produção de energia elétrica nacional.

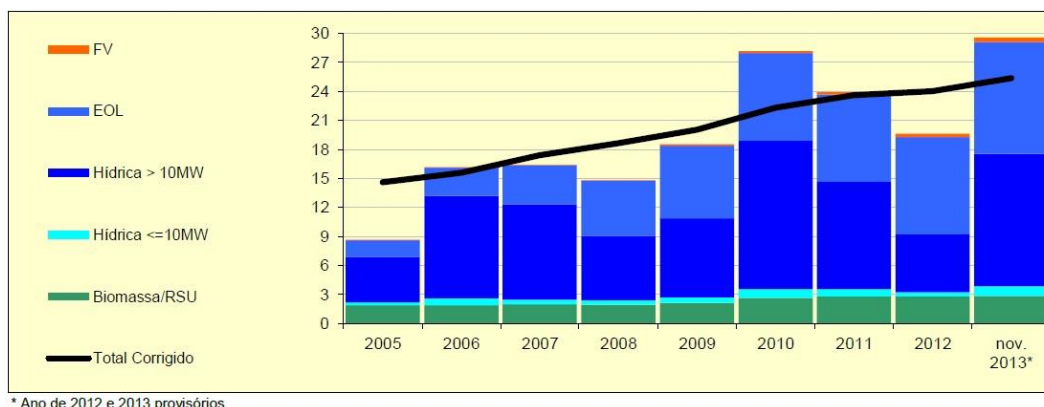


Fig. 27 - Evolução da energia produzida em Portugal a partir de fontes renováveis (FV- Fotovoltaica, EOL – Eólica, RSU – Resíduos Sólidos Urbanos) (TWh) [31].

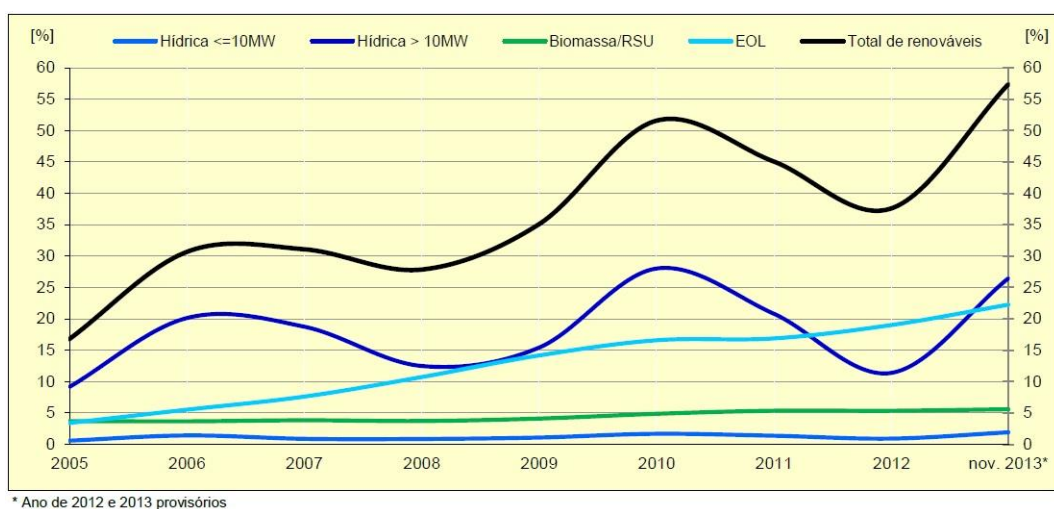


Fig. 28 - Evolução do peso da produção das energias renováveis na produção bruta+ saldo importador em Portugal Continental [31].

As fontes renováveis de energia assumiram na última década um papel incontornável no *mix* elétrico nacional, sobretudo com o aumento do número de parques eólicos e de centrais hídricas em território português.

Em Portugal, o sector das energias renováveis concentra-se predominantemente nas fontes de energia hídrica, eólica e biomassa, existindo também centrais, embora de menor relevo, nos sectores da energia solar fotovoltaica, biogás e geotérmica, estando-se agora a iniciar uma produção embrionária a partir das ondas.

Nos últimos anos o sector registou níveis de crescimento consideráveis que apresentam um impacto significativo na criação de riqueza, de empregos e desenvolvimento regional, além de contribuir significativamente para a redução das emissões de gases de efeito de estufa. Adicionalmente, o sector de energias renováveis permite a redução da dependência energética do

país, através da redução das importações de energia e de combustíveis fósseis, que se traduz numa poupança considerável a nível da balança comercial portuguesa [35].

3.4. MERCADO EÓLICO MUNDIAL

A capacidade eólica mundial atingiu 296.255 MW no final de Junho de 2013, dos quais 13.980 MW foram adicionados nos primeiros seis meses de 2013, como se pode observar na Fig. 29. Este aumento foi significativamente menor que na primeira metade de 2012 e 2011, quando foram adicionados 16,5 e 18,4 MW, respetivamente. Todas as turbinas instaladas a nível mundial podem gerar, aproximadamente, 3,5% da procura mundial de eletricidade.

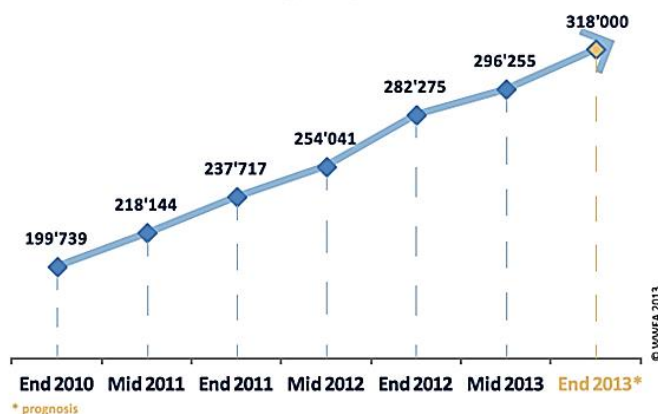


Fig. 29 - Capacidade total instalada de energia eólica entre 2010 e 2013 em MW [36].

Atualmente, a China constitui o maior mercado de energia eólica. Na Fig. 30, representa-se a capacidade eólica dos dez países com maior produção de energia eólica na primeira metade de 2013.



Fig. 30 - Capacidade eólica instalada por país [36].

Nos últimos anos, o mercado mundial de turbinas eólicas de pequena dimensão - turbinas eólicas cuja potência nominal, nalguns países, pode ir até aos 100 kW, apresenta um elevado crescimento. A partir do final de 2011, pelo menos 730.000 turbinas eólicas de pequena dimensão estavam instaladas em todo o mundo, excluindo dois grandes mercados como a Índia e a Itália. Durante esse ano, o número de pequenas turbinas eólicas instaladas cresceu 11%, tendo sido instaladas 74.000 unidades.

Atualmente, a China constitui o maior mercado de energia eólica, continuando a ultrapassar outros grandes mercados, como os EUA e o Reino Unido, com um total acumulado de 500.000 unidades instaladas, o que representa cerca de 68% do mercado mundial [37].

Mais de 120 MW de capacidade instalada de pequenas turbinas eólicas foram instalados em 2011, representando um aumento da capacidade instalada global de 27%. Esta capacidade atingiu mais de 576 MW a partir do final de 2011, sendo a China responsável por, aproximadamente, 40% e os EUA por 35% desta capacidade instalada, como se pode observar na Fig. 31.

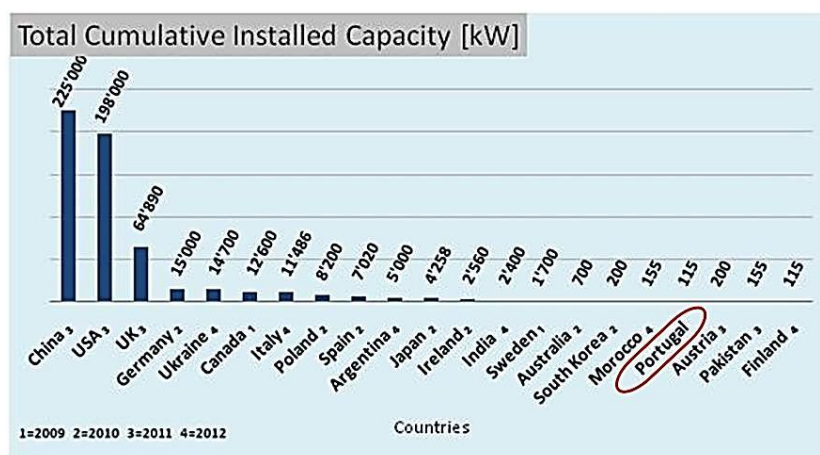


Fig. 31 – Capacidade de energia eólica instalada acumulada total por país [37].

3.5. MERCADO EÓLICO EUROPEU

Durante o ano de 2012, foram instalados na Europa 12.744 MW de energia eólica, dos quais 11.895 MW na União Europeia. No final de 2012, o total acumulado em toda a Europa era de 109.581 MW, sendo 106.040 MW na União Europeia e desses 4.525 MW em Portugal.

O crescimento da capacidade instalada na União Europeia em 2012 foi de 12,6% em relação ao ano anterior, similar ao crescimento registado em 2011, como se pode observar na Fig. 32 (a). Na Fig. 32 (b) representa-se a quota de cada membro da união europeia na capacidade total instalada em 2012, ou seja, reportada a 106 GW.

A capacidade eólica instalada no final de 2012, um ano normal de vento, produziu 231 TWh de eletricidade, representando 7% do consumo final da União Europeia. A Dinamarca apresenta-se como o país com maior taxa de penetração de energia eólica no consumo de eletricidade (27,1%) como se pode observar na Fig. 33, seguida de Portugal e Espanha, respetivamente, com 17% e 16%, e ainda acima dos 10% da Irlanda e da Alemanha [38].

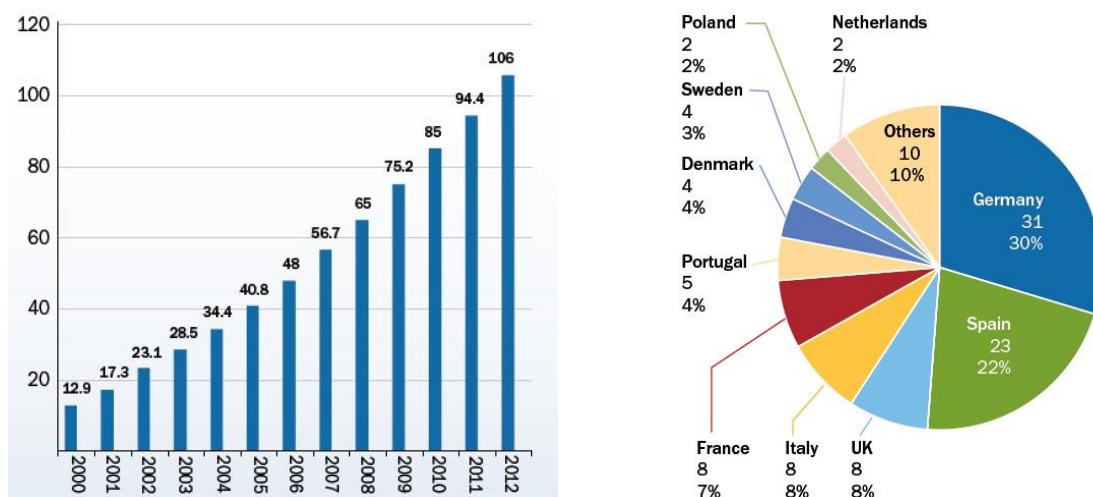


Fig. 32 - Energia eólica instalada acumulada na UE em GW (à esquerda) e quota dos membros da UE na capacidade total instalada em 2012 (à direita) [38].

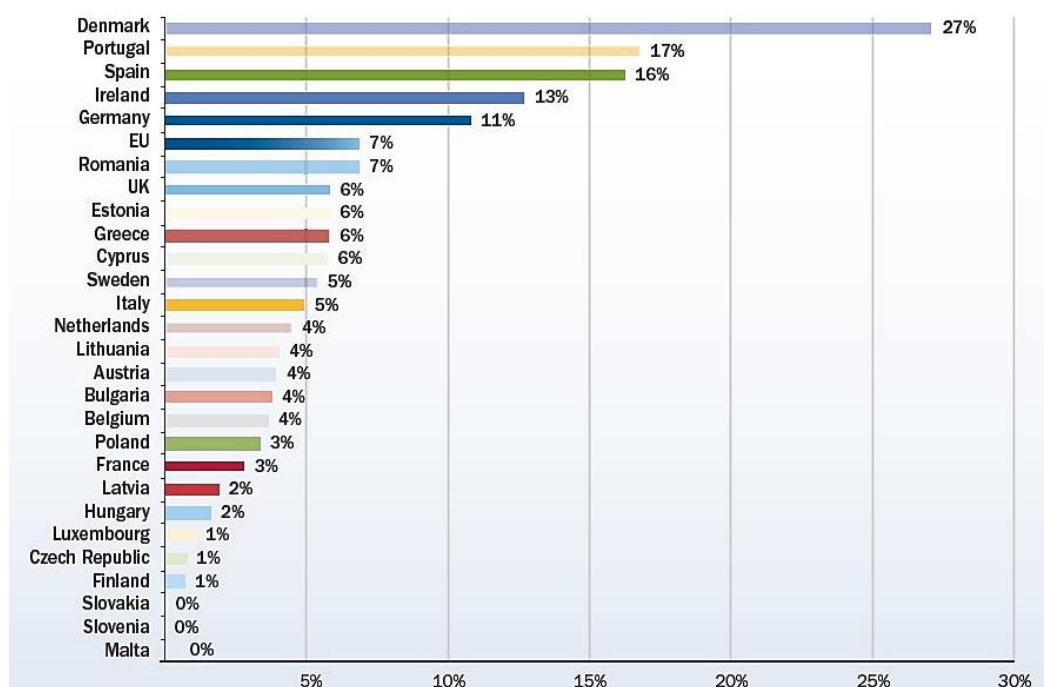


Fig. 33 - Percentagem de energia eólica do consumo total de eletricidade na União Europeia e por Estado Membro [38].

3.6. MERCADO EÓLICO PORTUGUÊS

3.6.1. INTRODUÇÃO

Como já foi referido, em 2012, a energia eólica atingiu a quota mais elevada de sempre, cerca de 20% da produção total de eletricidade foi satisfeita a partir da energia eólica. Esta fonte de energia permitiu uma produção de eletricidade de 10.012 GWh que representam cerca de 54% do total de eletricidade produzido a partir de fontes renováveis [34].

No final de 2012, a potência total instalada no Sistema Elétrico Nacional era de 18.546 MW, da qual a energia eólica efetivamente ligada à rede correspondia a 4.194 MW, ao qual estava associado um incremento de 114 MW, em 2012, o valor mais baixo dos últimos 9 anos. Na Fig. 34, apresenta-se a evolução anual da potência total de energia eólica ligada à rede em Portugal desde 2003 [39].

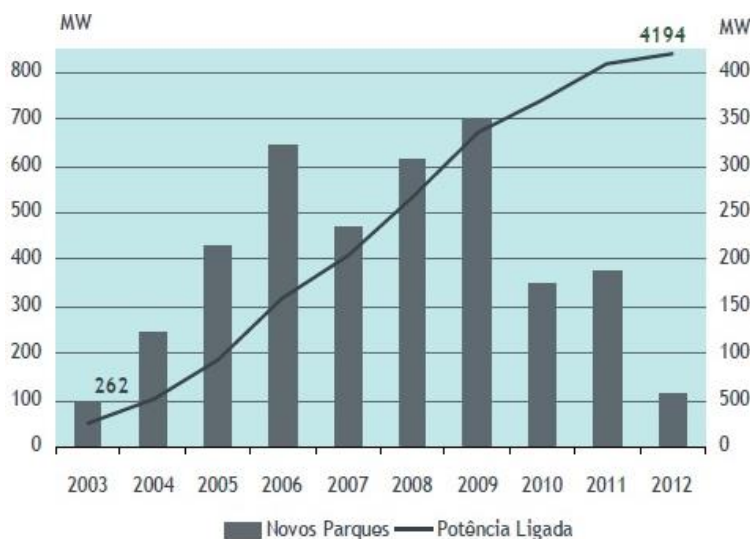


Fig. 34 - Potência instalada anualmente e potência acumulada, de energia eólica em Portugal [39].

No final de 2012, a potência eólica na rede representava 23% da potência total ligada ao Sistema Elétrico Nacional, somando todas as fontes de energia renovável cerca de 58% da potência total instalada em Portugal.

A capacidade eólica acumulada instalada até 2012 está distribuída por 223 parques eólicos, com 2.408 turbinas eólicas a operarem no país, sendo uma delas uma turbina eólica *offshore*. Devido às características do território português, as grandes turbinas eólicas operam usualmente em dois ambientes diferentes, na faixa litoral ou nas regiões montanhosas.

No final de 2011, foi instalado, na povoação de Aguçadoura, o primeiro sistema eólico *offshore*, o *WindFloat*, era composto por uma estrutura semi-submersível e uma turbina, *Vestas V80* com 2 MW. Este local encontra-se a 6 km *offshore* da Póvoa do Varzim com uma profundidade de aproximadamente 50 m [40]. A Fig. 35 (a) e (b) apresentam a localização dos parques eólicos instalados em Portugal e a respetiva potência de ligação.

Apesar do forte desenvolvimento de energia eólica em Portugal, nos últimos anos, a potência instalada tenderá a abrandar até 2020, dado o esperado abrandamento da procura de energia.

Os objetivos atualmente em vigor foram estabelecidos em Abril de 2013 aquando da revisão do primeiro Plano Nacional de Ação para as Energias Renováveis, com o novo PNAER2020, que estabeleceu ações necessárias para atingir uma capacidade mínima de 5.300 MW até 2020, onde 5.273 MW serão instalados *onshore* e 27 MW *offshore* através da continuidade do projeto *Windfloat* [32].

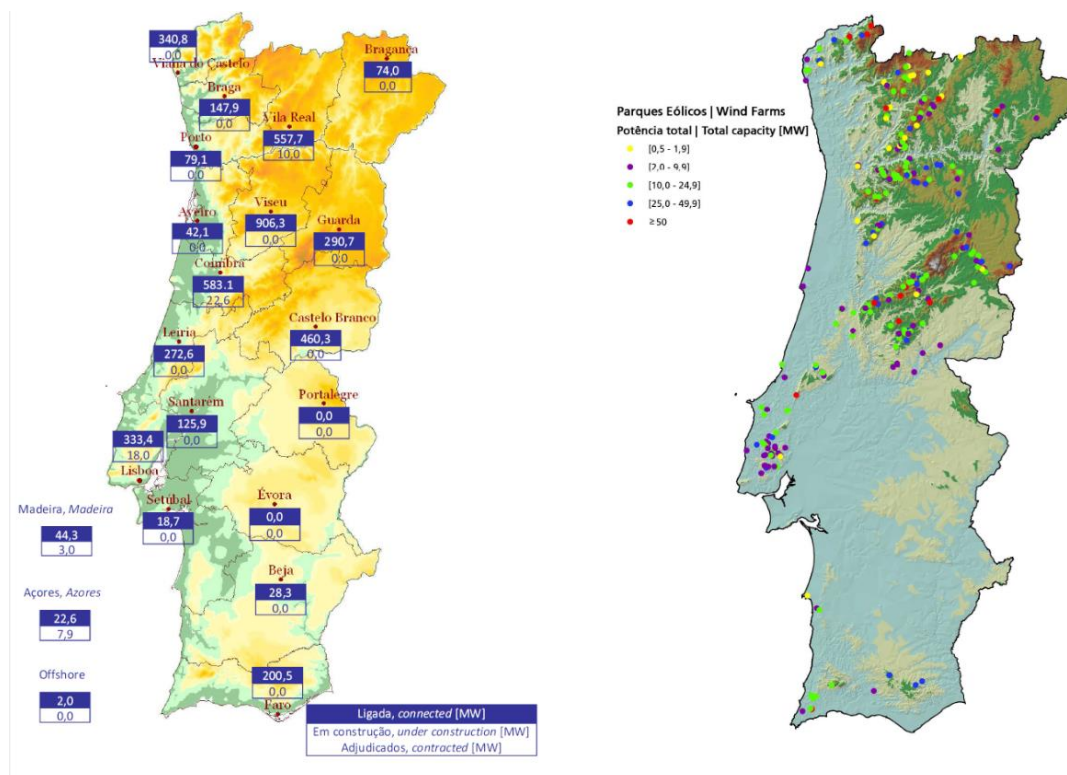


Fig. 35 - Distribuição de parques eólicos em Portugal em Dezembro de 2012: potência ligada e em construção por concelho (à esquerda), potência total por parque eólico em funcionamento (à direita) [41].

O facto da energia eólica ser uma fonte de energia intermitente, sendo impossível aumentar a quantidade de energia produzida de acordo com a procura de energia, pode constituir um parâmetro limitador no desenho do sistema elétrico português, dada a elevada contribuição que esta fonte de energia pode aportar para o sistema elétrico nacional, como exemplo:

- A maior participação da produção eólica no consumo ocorreu no dia 14 de abril de 2012, com 65%.
- No dia 28 de outubro às 5h30m, a potência eólica instantânea foi de 3.271 MW que correspondeu a 86% do consumo, a participação mais elevada verificada em 2012.
- Em 2012, o máximo histórico da potência eólica instantânea fixou-se em 3.754 MW, verificados no dia 14 de dezembro às 14h45m. Este valor correspondeu a 90% da potência ligada nessa altura.
- A máxima produção eólica diária ocorreu também no dia 14 de dezembro de 2012, atingindo-se 84 GWh, o que correspondeu a 54% do consumo verificado nesse dia.

3.6.2. O SISTEMA ELÉTRICO NACIONAL

Nos últimos anos tem havido um grande interesse na produção de energia através de fontes renováveis de forma a maximizar o seu potencial. O desenvolvimento de tecnologias de produção elétrica de pequena escala, os incentivos do estado na promoção do uso de energia proveniente de fontes renováveis e a liberalização do mercado energético foram alguns dos fatores que

contribuíram para a crescente utilização de pequenas tecnologias para produção de energia, mesmo de uma forma não integrada no Sistema Elétrico Nacional.

A produção de energia através da instalação de geradores de pequena dimensão localizados junto dos pontos de consumo apresenta várias vantagens para além daquelas já associadas às energias renováveis em geral. Segundo Ana Estanqueiro, diretora da unidade de energia eólica e dos oceanos do INETI [42] estas consistem na:

- Diminuição das perdas de transmissão e distribuição de eletricidade;
- Redução da sobrecarga da Rede Nacional de Transporte e a necessidade de novos investimentos;
- Redução da necessidade de novas centrais, quando aliada à eficiência energética.

Além de dar mais autonomia e poder de decisão aos consumidores individuais e às comunidades locais, bem como gerar um novo *cluster* industrial e de serviços com impacto importante na criação de emprego e no crescimento económico.

O Sistema Elétrico Nacional (SEN) está regulado através do Decreto-Lei n.º 29/2006 de 15 de Fevereiro, alterado pelo Decreto-Lei n.º 215-A/2012 de 8 de Outubro [43]. O SEN engloba a produção, o transporte e a distribuição de eletricidade; bem como a sua comercialização, além de todos os agentes envolvidos nas diferentes fases acima descritas e, ainda, os consumidores finais.

A produção de eletricidade integra a classificação de produção em duas categorias:

- Produção em regime ordinário (PRO);
- Produção em regime especial (PRE) que engloba a cogeração e a produção de eletricidade através de recursos endógenos, renováveis e não renováveis, a microprodução, a miniprodução e a produção sem injeção de potência na rede.

A atividade de transporte de eletricidade, que integra a gestão global do sistema, é exercida em regime de concessão de serviço público, em exclusivo, mediante a exploração da Rede Nacional de Transporte de Eletricidade (RNT), que liga os produtores aos centros de consumo. Atualmente, a concessão exclusiva da transmissão de eletricidade está concedida à REN - Redes Energéticas Nacionais.

A distribuição de eletricidade tem por base a rede nacional de distribuição (RNT), que se reparte em dois sistemas consoante o nível de tensão:

- Rede Nacional de Distribuição de Eletricidade em Média e Alta Tensão (RND), concessionada pelo Governo e que atualmente é da responsabilidade da EDP Distribuição;
- Redes de Distribuição de Baixa Tensão (BT) que são atribuídas, mediante contratos outorgados pelos órgãos competentes dos respetivos municípios.

O exercício da atividade de comercialização de eletricidade é livre, ficando sujeito a registo prévio e desde 4 de Setembro de 2006 todos os consumidores em Portugal continental podem escolher o seu fornecedor de energia elétrica. O propósito da liberalização do sector era permitir a entrada de novos agentes, introduzindo a concorrência no sector suscetível de aumentar a eficiência das empresas e de gerar benefícios para os consumidores [44].

3.6.3. PRODUÇÃO DESCENTRALIZADA DE ENERGIA: MICRO E MINIPRODUÇÃO

3.6.3.1. Introdução

A produção descentralizada de energia é caracterizada pela sua geração em pequena escala e engloba tanto a microprodução como a miniprodução de energia, incluídas na produção em regime especial, que por sua vez se encontra enquadrada nas bases de organização e funcionamento do Sistema Elétrico Nacional (SEN). Ao exercício desta atividade está subjacente a garantia do abastecimento, no âmbito do funcionamento de um mercado liberalizado, em articulação com a promoção de uma política que confere grande relevância à eficiência energética e à proteção do ambiente, incrementando a produção de eletricidade mediante o recurso a fontes endógenas renováveis de energia.

Os conceitos de microprodução e miniprodução referem-se aos sistemas de produção em pequena escala que utilizam tecnologias de baixas potências, que podem, ou não, ser ligadas à rede pública de baixa tensão.

3.6.3.2. Enquadramento legal

A produção de energia elétrica em baixa tensão destinada essencialmente ao autoconsumo, com possibilidade de entrega à rede pública, era regulada pelo Decreto-Lei n.º 68/2002, de 25 de Março [45], tendo sido recentemente revogado pelo Decreto-Lei n.º 34/2011 de 8 de Março [46]. Foi neste enquadramento legal que surgiu a figura de “produtor-consumidor” de energia elétrica em baixa tensão e do “produtor em autoconsumo”, ou seja, existe a possibilidade de que a eletricidade produzida se destine predominantemente a consumo próprio, podendo o excedente ser entregue a terceiros ou à rede pública embora, neste último caso, com um limite de 150 kW.

No caso da microprodução, o regime jurídico aplicável é o Decreto-Lei n.º 363/2007 [47] de 2 de Novembro alterado pelo Decreto-Lei n.º 25/2013 de 19 de Fevereiro [48] que o republica na íntegra, onde se estabelecem as regras relativas à produção de eletricidade de instalações de pequena potência entre as quais se incluem a microprodução de eletricidade, em baixa tensão e tendo por base uma só tecnologia de produção, a partir de recursos renováveis e à microprodução de eletricidade e calor em cogeração, ainda que não renovável:

- com potência de ligação até 5,75 kW no caso da utilização de uma unidade ou instalação monofásica ou trifásica;
- com uma potência até 11,04 kW no caso dos condomínios com seis ou mais frações e instalações trifásicas.

O produtor tem o dever de entregar a totalidade da energia produzida, líquida do consumo dos serviços auxiliares, à rede pública de distribuição em baixa tensão, podendo ser ressarcido segundo dois regimes de remuneração: o regime geral e o regime bonificado, sendo definidas nesse documento legal as regras segundo as quais um produtor poderá aceder a cada regime remuneratório.

- Salienta-se, no entanto, que no regime bonificado o produtor é remunerado com base numa tarifa de referência que vigorar à data da emissão do certificado de exploração, aplicável durante um total de 15 anos contados desde o 1.º dia do mês seguinte ao do início do fornecimento, subdivididos em dois períodos, o primeiro com a duração de 8 anos e o segundo com a duração dos subsequentes 7 anos. Essa tarifa de referência é, atualmente, de € 400/MWh para o primeiro período e de €

240/MWh para o segundo período, sucessivamente reduzida anualmente em € 20/MWh, sendo corrigida em função do tipo de energia primária utilizada:

- Solar - 100%;
- Eólica - 80%;
- Hídrica - 40%;
- Cogeração a biomassa - 70%;
- Pilhas de combustível com base em hidrogénio proveniente de microprodução renovável - percentagem revista nas alíneas anteriores aplicável ao tipo de energia renovável utilizado para a produção do hidrogénio;
- Cogeração não renovável - 40%.

No que diz respeito à miniprodução, a legislação aplicável é o Decreto-Lei n.º 34/2011 de 8 de Março alterado pelo Decreto-Lei n.º 25/2013 de 19 de Fevereiro que o republica na íntegra [48].

Segundo este Decreto, uma *unidade de miniprodução* corresponde a uma “*instalação de produção de eletricidade, a partir de energias renováveis, baseada em uma só tecnologia de produção cuja potência de ligação à rede seja igual ou inferior a 250 kW*”.

São ainda definidos três escalões de potência de ligação à rede correspondendo o escalão I a unidades cuja potência não seja superior a 20 kW, o escalão II àquelas cuja potência de ligação seja superior a 20 kW e igual ou inferior a 100 kW e o escalão III às unidades de miniprodução cuja potência de ligação seja superior a 100 kW e igual ou inferior a 250 kW.

O produtor tem o dever de entregar à RESP, a totalidade da energia ativa produzida, líquida do consumo dos serviços auxiliares, e o regime remuneratório a que pode aceder é muito semelhante ao descrito para a microprodução encontrando-se estabelecido no mesmo documento.

Salienta-se ainda, relativamente à produção para autoconsumo, que apesar da revogação do Decreto-Lei n.º 68/2002, de 25 de Março [45], as instalações de produção de eletricidade licenciadas no seu âmbito, continuam até hoje a reger-se pelo que nele se dispõe, não existindo ainda regulamentação para novas instalações destinadas ao autoconsumo.

Contudo, segundo um comunicado da Associação Portuguesa de Empresas do Sector Fotovoltaico (APESF) [49], esta regulamentação está a ser ultimada, estando prevista a criação de três novos enquadramentos legais: autoconsumo sem ligação de potência à rede, com ligação de potência à rede e em sistemas isolados da RESP (redes do Sistema Elétrico de Serviço Público). Segundo este comunicado, até à entrada em vigor deste regulamento é possível a realização de sistemas para autoconsumo, em paralelo com a rede, até 1MWn, através da portaria da comunicação prévia, que vem assegurar um licenciamento simplificado para unidades de produção em autoconsumo. Para esse efeito, é necessário que o interessado neste tipo de produção emita uma carta declarando o compromisso em como assegura que não irá injetar potência na RESP; não pretende ingressar em nenhum regime bonificado e aceitar a imediata integração da instalação ao abrigo do regime de autoconsumo, que está já em preparação.

3.6.3.3. Micro e Miniprodução Eólica

A exploração completa do recurso eólico oferece outras possibilidades para além dos parques eólicos, entre elas a instalação de pequenas turbinas eólicas para, por exemplo, utilização em meio urbano.

O avanço tecnológico proporcionado pela produção de energia eólica em larga escala criou condições para investimentos noutros subsectores das energias renováveis como as pequenas turbinas eólicas. Este setor tem especial relevância devido ao baixo custo das soluções que existem no mercado. Acresce ainda o facto de se poderem considerar um complemento à energia solar uma vez que o uso de pequenas turbinas pode facilmente preencher algumas falhas de alimentação e contribuir, assim, para uma produção de energia mais estável no setor doméstico [50].

Segundo o portal “Renováveis na hora” [51] atualmente, em Portugal estão registadas no “Sistema de registo da microprodução” (SRM), 134 unidades de microprodução eólica e no “Sistema de registo da miniprodução” (SRMini) 2 unidades de miniprodução eólica, respetivamente, para um total de 25.034 e 1.047 unidades em cada um dos sistemas. As 134 unidades de microprodução perfazem uma potência total de ligação de 455 kW e as de miniprodução eólica apresentam uma potência de ligação de 60 kW.

Na Fig. 36 apresenta-se o número de unidades de mini e microprodução registadas em Portugal, por distrito, até ao final de 2013 [51].

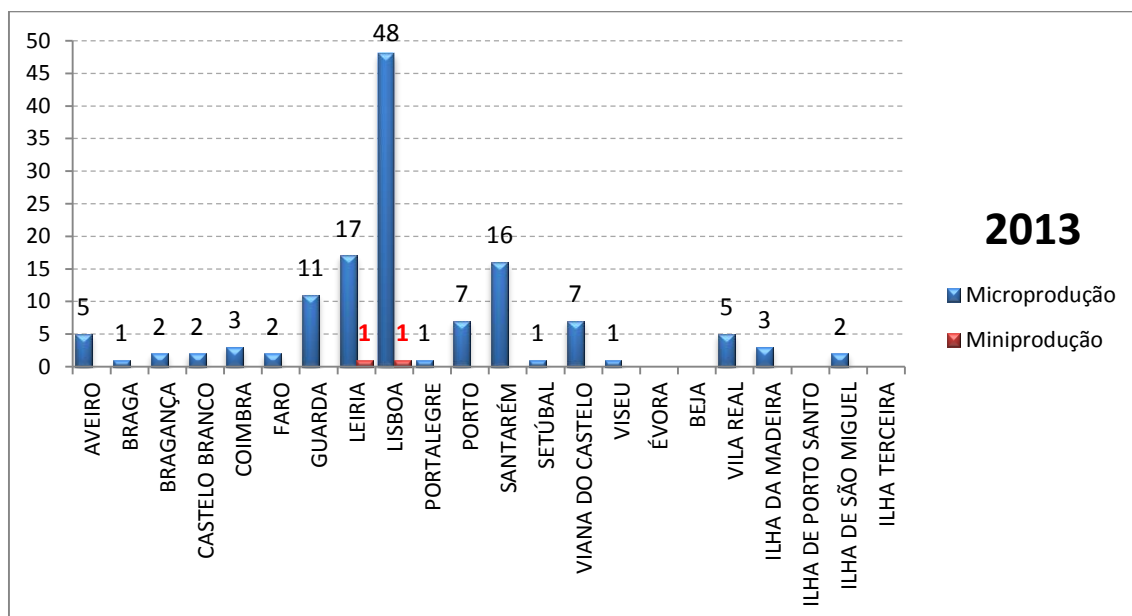


Fig. 36 - Unidades de micro e miniprodução instaladas em Portugal.

Ainda de acordo com a informação recolhida no portal “Renováveis na Hora”, na Fig. 37 representa-se a evolução ao longo dos anos do número de unidades de mini e microprodução eólica registadas em Portugal.

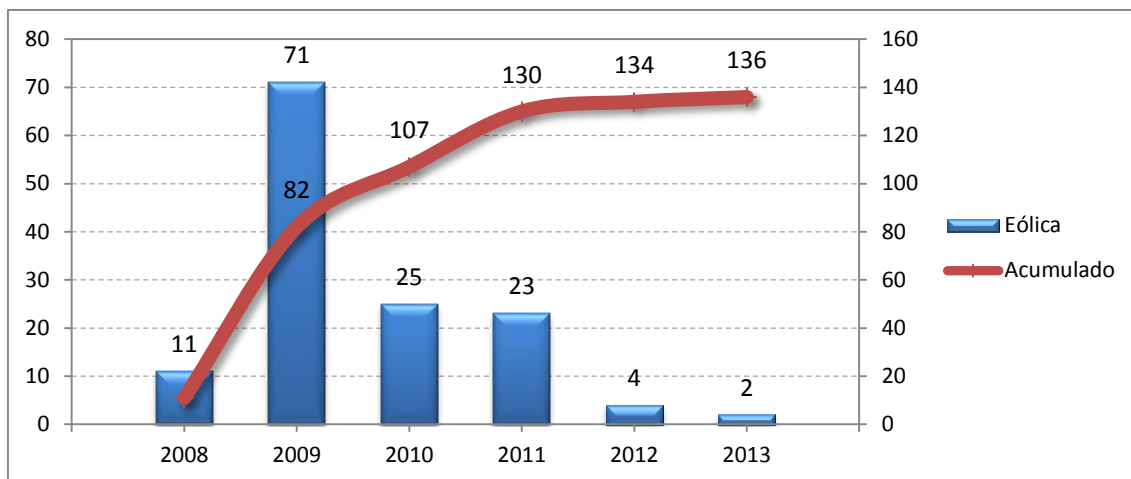


Fig. 37 - Evolução ao longo dos anos do número de unidades de micro e miniprodução eólica.

Apesar de o número de turbinas eólicas instaladas a partir de 2010 ter vindo a diminuir com apenas duas unidades instaladas em 2013, a potência instalada em 2013 foi mais elevada do que em 2012, onde apenas se registaram 15,81 kW de potência distribuídos por quatro unidades de microprodução, como se pode observar na Fig. 38.

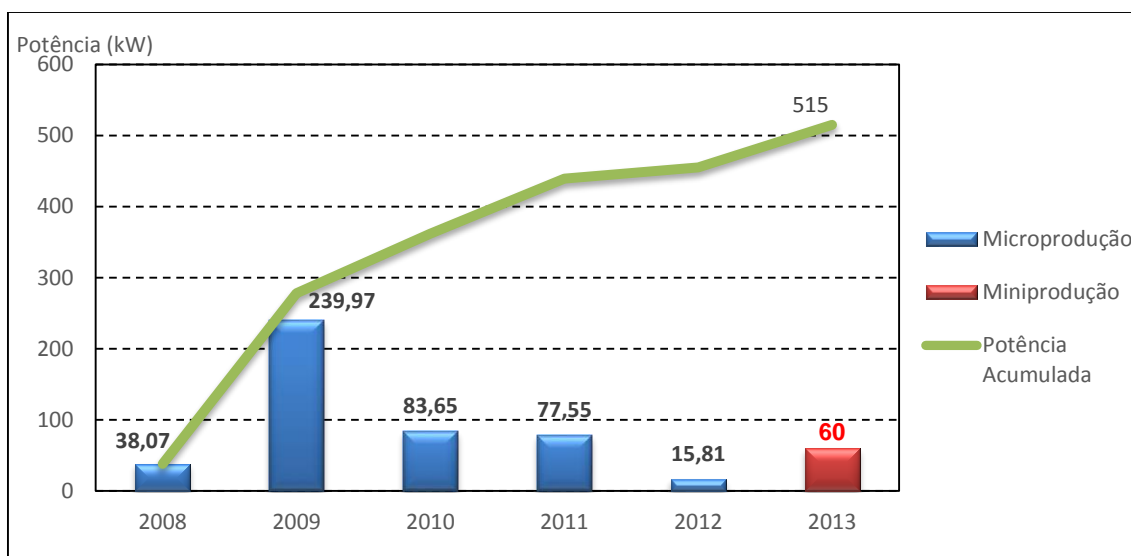


Fig. 38 - Evolução da potência de ligação (kW)

3.7. POTENCIAL EÓLICO PARA SOLUÇÕES DE PEQUENA GERAÇÃO

3.7.1. CARACTERIZAÇÃO DO RECURSO EÓLICO

Uma aplicação interessante para as turbinas de pequena dimensão é a sua utilização em ambiente urbano e construído. A energia eólica, em meio urbano, apresenta um elevado potencial de exploração, quer ao nível da instalação de pequenas turbinas nos topos de edifícios, quer ao nível da sua integração nos terrenos circundantes, desde que a sua conceção seja pensada de forma a prever este tipo de aproveitamento.

O vento é uma característica determinante no desempenho das turbinas eólicas, sendo necessário caracterizar o recurso eólico em meio urbano de forma a encontrar o tipo de turbina mais adequado e a selecionar a melhor localização para a sua instalação.

As características de vento em zonas periurbanas e fora das cidades (ambiente rural) são bastante distintas das que se verificam nas zonas construídas. Em ambientes mais rurais encontram-se grandes áreas com condições de rugosidade aproximadamente uniformes que contrastam com as áreas urbanas, onde os obstáculos e a rugosidade se alteram em curtas distâncias, como se pode observar na Fig. 39.

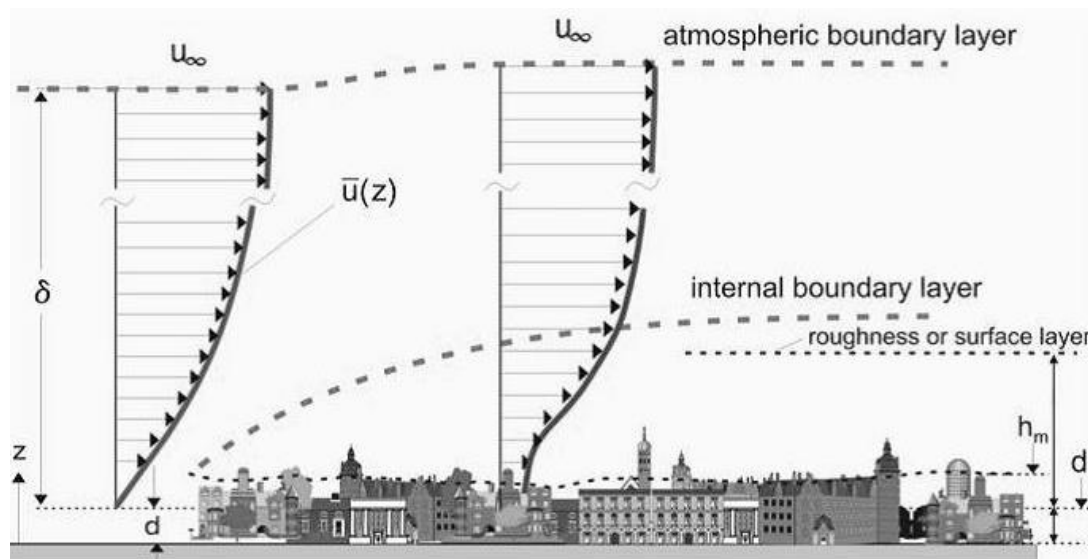


Fig. 39 - Mudança brusca na rugosidade da superfície e regime de ventos em ambiente urbano [52].

O vento nas cidades tende a ser menos estável e previsível e bastante mais turbulento. O clima eólico local depende da envolvente, por exemplo, está relacionado com a distância a áreas mais desafogadas como o extremo da cidade, um parque, lago ou a uma rua de elevado tráfego. Geralmente, as velocidades do vento em meio urbano são mais reduzidas e com uma orientação mais errática [52].

As baixas velocidades de vento devem-se às irregularidades e à rugosidade do terreno, criadas pelos edifícios, pelas vias e por outras características do ambiente urbano, que fazem com que o aumento da velocidade do vento com a altura acima do solo seja mais lento. O escoamento turbulento resulta da interação com os edifícios e outros obstáculos [53].

Para além das condições de circulação do vento num dado local, que condicionam a escolha do local para a colocação da turbina, também existe outro elemento importante neste contexto: a relação entre a velocidade do vento e a potência da turbina. Em geral, esta relação é representada por uma curva de potência, exemplificada na Fig. 40.

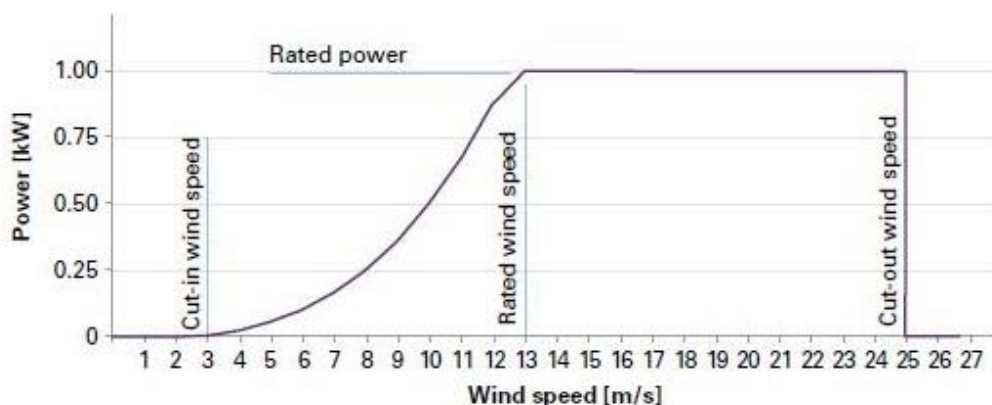


Fig. 40 – Exemplo da curva de potência de uma turbina eólica [27].

A velocidade do vento, no que se refere ao funcionamento de uma turbina eólica, apresenta quatro momentos chave [27]:

- *Velocidade “zero”;*
- *Velocidade de arranque:* velocidade a partir da qual a turbina começa a gerar energia (“*cut-in wind speed*”);
- *Velocidade nominal:* velocidade à qual a turbina produz a sua potência nominal, aproximadamente entre os 11 e os 13 m/s (47 km/h) (“*rated wind speed*”);
- *Velocidade de paragem:* velocidade além da qual a turbina não consegue gerar energia, normalmente aos 25 m/s (90 km/h) (“*cut-out wind speed*”).

Em geral, as características de vento e a curva de potência da turbina são usadas em conjunto, para selecionar a turbina mais adequada para uma dada localização e para determinar a quantidade de energia que a turbina poderá gerar nesse local durante um dado intervalo de tempo.

O recurso eólico disponível depende primariamente das condições de macro escala (continentais) e meso-escala (regionais). Contudo, em meio urbano, as circunstâncias de microescala (locais) podem ser críticas.

Apesar da monitorização local ser a melhor maneira de determinar as características do recurso eólico disponível, a avaliação a uma escala macro pode constituir um bom ponto de partida, recorrendo a dados de estações meteorológicas existentes nas proximidades, procurando analisar posteriormente os efeitos de microescala através de uma inspeção qualitativa [54]. De seguida examinam-se estes dois aspetos com maior detalhe.

3.7.1.1. Avaliação eólica: macro escala

A caracterização do clima de uma região ou de um país em particular, no que se refere ao vento, apresenta três componentes, que são a chave da avaliação do recurso eólico:

- A velocidade média anual;
- O perfil de distribuição do vento;
- A direção do vento.

O principal fator é a “velocidade de vento média anual”, que se pode encontrar em séries cronológicas, normalmente disponíveis em estações meteorológicas próximas e que são iguais à soma dos valores da média horária para um ano, divididos pelo número de horas do ano.

O segundo fator é o “perfil de distribuição do vento”, onde se representa o número de horas por ano, durante as quais, certos intervalos de velocidades de vento ocorrem.

A terceira componente é a direção do vento, que apresenta uma importância vital na avaliação da adequação de uma localização particular em ambiente urbano bem como do tipo de turbina mais apropriada para a localização que se tem em vista, uma vez que em múltiplas situações o local onde se pode implantar a turbina já está pré-determinado pela existência do edifício ou pela posse do terreno [54].

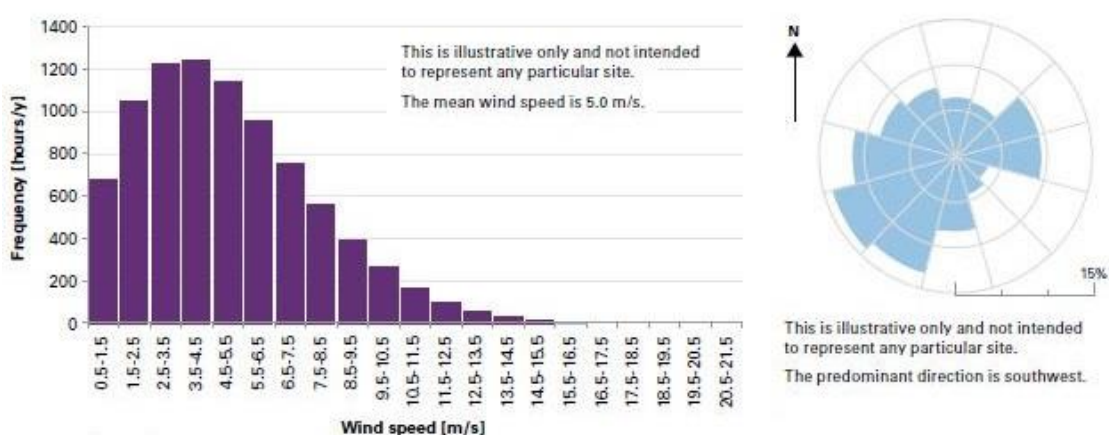


Fig. 41 – Exemplo de um perfil de distribuição do vento e de uma rosa-dos-ventos [27].

Na Fig. 41, pode observar-se o exemplo de um “perfil de distribuição do vento”, onde existe uma tendência para a predominância de baixas velocidades do vento e, à direita, o exemplo de uma rosa-dos-ventos, a representação gráfica da direção do vento em que, no caso apresentado, a direção predominante é de sudoeste.

3.7.1.2. Avaliação eólica: microescala

Quando se procura perceber o comportamento do vento em meio urbano, verifica-se que não é um processo simples. A mera existência de edifícios, a forma como se agrupam, a altura e a diferença de alturas entre si, são fatores que influenciam significativamente as condições de propagação do vento.

A Fig. 42 ilustra como diferentes disposições de edifícios isolados podem perturbar a circulação do vento, gerando várias direções de escoamento e induzindo situações de turbulência. Quando se pretende instalar turbinas em meio urbano, estas zonas de escoamento perturbado devem ser evitadas, o que se pode conseguir elevando as pás da turbina suficientemente acima do nível do topo do edifício, de forma a atingir a “região não perturbada”.

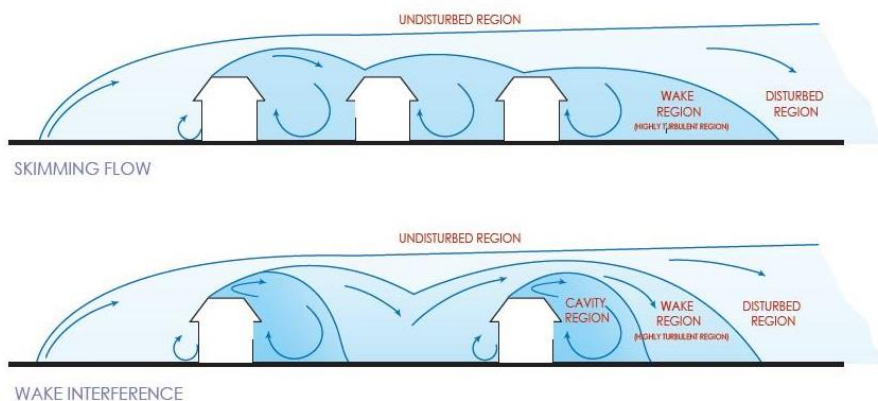


Fig. 42 - Regimes de vento em meio urbano mostrando regiões “perturbadas” e regiões altamente turbulentas à volta de edifícios [54].

Geralmente, a região de escoamento perturbado, no caso de “rugosidade induzida por edifícios isolados”, é igual a duas vezes a altura dos obstáculos, como se pode observar na Fig. 43.

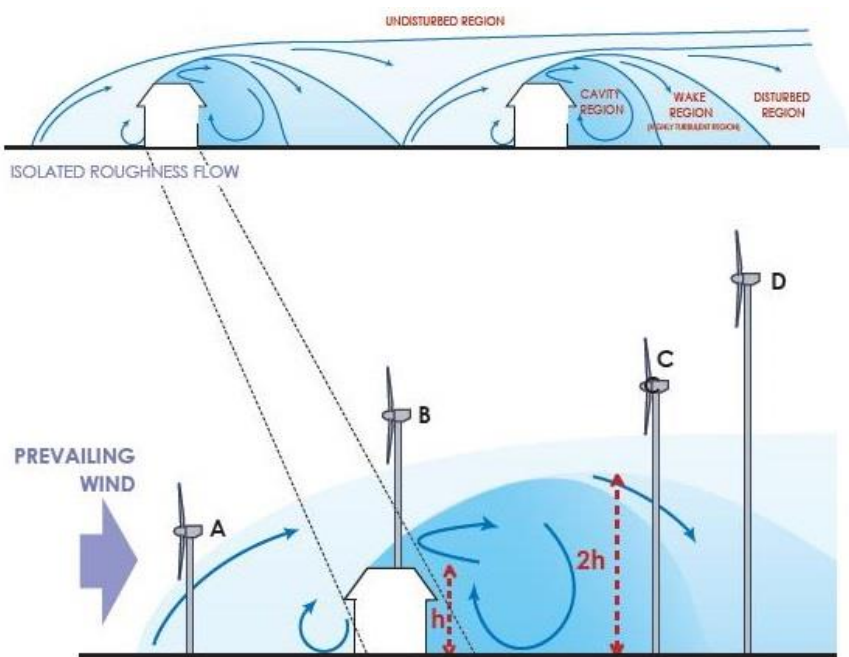


Fig. 43 - Várias posições de turbinas eólicas no caso do escoamento com “rugosidade induzida por edifícios isolados” [54]

Consequentemente, as pás das turbinas devem ser colocadas, pelo menos, ao dobro da altura do obstáculo mais elevado para evitar perda de potência. A região de influência do edifício, em termos de turbulência, estende-se na horizontal-entre 10 a 20 vezes a altura do obstáculo [54].

No caso de se estar na presença de vários edifícios, por exemplo, numa rua já construída de ambos os lados (perfil em U), apenas de um dos lados (perfil em L) ou, eventualmente no caso de um quarteirão, o tamanho e a densidade dos obstáculos das regiões vizinhas da localização de uma

turbina devem ser avaliados. Esta avaliação é feita através de categorias de “rugosidade do terreno”.

Na Fig. 44 podem observar-se três tipos diferentes de terrenos com a sua correspondente “rugosidade aerodinâmica”, Z_0 , e os respetivos perfis de velocidade de vento associados a cada uma das situações. A primeira situação corresponde ao centro de uma cidade, a segunda a um terreno suburbano e a terceira a um terreno em campo aberto [54].

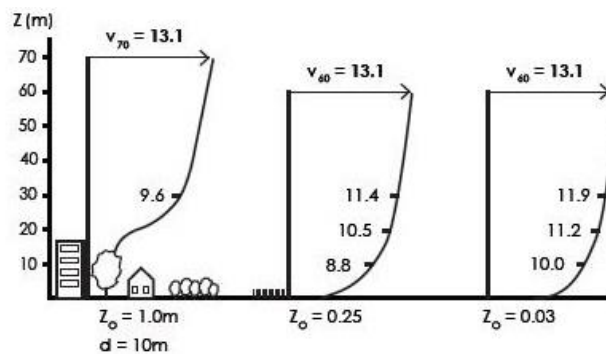


Fig. 44 - Perfis de velocidades de vento associados a diferentes tipos de ocupação urbana e correspondente rugosidade aerodinâmica, Z_0 [54].

A velocidade do vento aumenta em altura enquanto, junto ao solo, a velocidade do vento é praticamente nula devido aos efeitos de resistência causados pela rugosidade do solo. Geralmente, a velocidade do vento aumenta em altura com uma acentuada aceleração até uma determinada distância acima do solo e com uma aceleração mais gradual, a partir dessa distância.

Na zona de rugosidade elevada e com edifícios muito próximos, o perfil é deslocado pra cima e muda de forma, fazendo com que a velocidade aumente mais lentamente em altura.

3.7.2. AVALIAÇÃO DO RECURSO EÓLICO

A avaliação do recurso eólico é usualmente feita em três etapas:

- A primeira envolve a estimativa da velocidade de vento local, com recurso a informações de estações meteorológicas locais e a modelos matemáticos em macro escala, por exemplo, dados de velocidades médias anuais a diferentes alturas acima do solo;
- A segunda etapa de análise pode ser feita através de medições no local com um anemómetro;
- A turbulência do vento é o terceiro parâmetro que requer consideração quando se monitoriza o vento em áreas urbanas.

Tipicamente, ventos de velocidades elevadas ao passarem por cima de obstáculos tornam-se mais turbulentos, o que não só reduz a quantidade de energia que pode ser extraída mas também aumenta a tensão na turbina e o desgaste no equipamento. A turbulência usualmente não é avaliada para projetos fora de ambiente urbano ou para pequenos projetos como turbinas eólicas residenciais devido aos elevados custos associados [54].

Para concluir a investigação do recurso eólico, deve-se prever a energia total anual gerada para uma dada turbina numa dada localização. As variáveis finais que devem ser estimadas são a temperatura média anual e a altitude do local a fim de se determinar a densidade do ar que tem impacto na produção de energia [54].

Atualmente estão disponíveis modelos de avaliação do recurso eólico que podem auxiliar no processo de decisão que permitem colmatar algumas lacunas que os modelos de micro escala habituais não são capazes de explicar (nomeadamente os efeitos mencionados em 3.7.1), embora descrevam de forma bastante simples o escoamento do vento em redor dos obstáculos.

Até agora, em Portugal os custos das campanhas experimentais de vento estavam associadas a elevados custos sendo na maior parte do caso mais caros que as próprias turbinas de pequena dimensão [50]. Devido à falta de meios para avaliar o recurso eólico em ambiente urbano, têm vindo a ser realizados estudos usando outras fontes de dados.

No caso português, está disponível o *Atlas do potencial eólico regional e nacional* [55], que pode ser usado como indicador da existência de vento adequado para instalação pontual de pequenas turbinas eólicas. Na Fig. 45 podem-se observar três mapas com uma resolução espacial de 3 x 3 km, provenientes desse *Atlas* que representam a distribuição espacial da velocidade média de vento estimada para três alturas (10 m, 60 m e 80 m) [55].

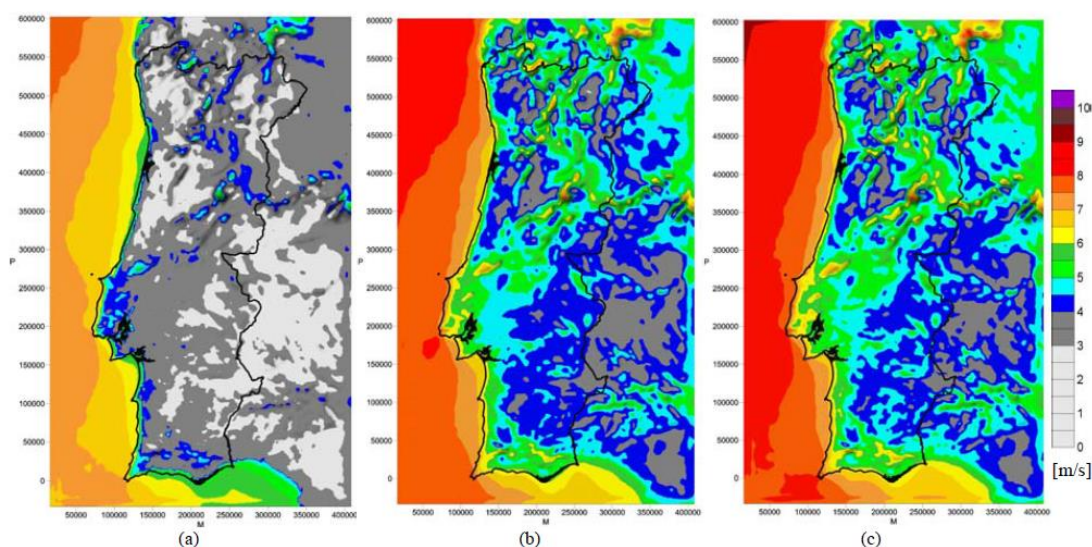


Fig. 45 – Distribuição espacial da velocidade média de vento estimada para diferentes alturas, (a) h=10 m, (b) h=60 m, (c) h=80 m [55].

Contudo, estas estimativas baseiam-se na aplicação de modelos tradicionais de microescala como WAsP (*Wind Atlas Analysis and Application Program*) [56] em conjunto com resultados de mesoescala que, apesar da sua validade, não estão devidamente adaptados para o ambiente urbano. O primeiro porque não tem em conta os efeitos tridimensionais do fluxo de vento sobre obstáculos como edifícios e outras estruturas urbanas e o último, porque apesar de ter em consideração estes efeitos, só possibilita a obtenção de resultados para uma grelha de espaçamento mínimo de 1 km por 1 km, o que não se pode considerar uma malha adequada para a caracterização detalhada dos edifícios e demais estruturas [50].

O WAsP é uma ferramenta que determina o potencial do vento baseada em informação sobre medições de vento próximas da área de interesse, parâmetros de rugosidade dos arredores e obstáculos esparsamente distribuídos a alguma distância do ponto de interesse. Usualmente ferramentas como o WAsP são usadas para estimar o potencial do vento em ambiente aberto e não de geometria complexa [52].

Existem outras possibilidades para a caracterização do micro clima em ambiente urbano, entre elas: a utilização de modelos CFD (*Computacional Fluid Dynamics*), medições no local ou testes em túneis de vento, incluindo uma extensão suficiente de área vizinha [52].

O recurso a modelos CFD constitui, atualmente, o estado da arte na modelação do comportamento do vento em redor das cidades ou de edifícios. No entanto, a aplicação destes modelos é complexa e implica elevado custo computacional o que leva, em termos práticos, às mesmas limitações associadas à realização de campanhas experimentais.

O uso de modelos físicos de uma cidade ou partes desta num túnel de vento aerodinâmico é provavelmente a solução mais adequada para modelar o fluxo de vento em áreas urbanas, apesar de também envolver um custo elevado [50].

Neste contexto, o LNEG (Laboratório Nacional de Energia e Geologia) encontra-se atualmente a desenvolver uma metodologia inovadora, de fácil aplicação, precisão aceitável e reduzido custo, para avaliar o recurso eólico em meio urbano, a *W.URBan*. A metodologia *W.URBan* baseia-se na geração de uma superfície envolvente aos edifícios de uma dada área urbana, a qual é posteriormente tratada em termos computacionais, como se de um terreno com orografia muito complexa se tratasse. A avaliação do potencial eólico e o correspondente mapeamento são, então, efetuados por aplicação de um modelo computacional linear, como por exemplo o *WAsP*, de forma a reduzir custos computacionais e simplificar o mapeamento da malha urbana. A metodologia ainda carece de calibração e validação, mas este procedimento encontra-se atualmente em curso para zonas da cidade de Torres Vedras. O recurso a modelos CFD existentes, como o modelo *UrbanWind* (geometria natural dos edifícios) e o modelo *WindSim* (superfície de cotas sobre a área de edifícios) quer desenvolvidos para aplicação em terrenos complexos, quer para sólidos representativos dos edifícios, afigura-se como a solução para proceder a uma primeira validação da metodologia [57].

4

AEROGERADORES

4.1. CLASSIFICAÇÃO DE AEROGERADORES

Quando se está a falar de turbinas eólicas existem diversos parâmetros que as permitem distinguir e que permitem a sua classificação. Os mais relevantes e que também estão associados com as opções que foram feitas na presente dissertação são os seguintes:

- Localização;
- Dimensão/potência;
- Orientação do eixo.

As turbinas eólicas podem ser classificadas de acordo com a sua localização no território, nomeadamente, se são implantadas no mar designando-se como turbinas *Offshore* ou em terra, adotando a denominação *Onshore*.

No que se refere à dimensão e à respetiva potência, os aerogeradores podem-se repartir em aerogeradores de grandes dimensões, de vários megawatts e em aerogeradores de pequena dimensão. Como já foi referido, no capítulo anterior os aerogeradores de pequena dimensão apresentam, em geral, uma potência nominal inferior a 100 kW e um diâmetro rotor das pás que não excede os 16 m.

Por último, de acordo com a orientação do eixo rotor, as turbinas eólicas podem-se repartir entre as de eixo horizontal (*HAWTs – Horizontal Axis Wind Turbines*) e as de eixo vertical (*VAWTs – Vertical Axis Wind Turbines*).

Para as turbinas de grandes dimensões, o mercado convergiu em turbinas de eixo horizontal de três pás, enquanto para turbinas eólicas de pequena dimensão, estão disponíveis turbinas com os dois tipos de eixos bem como uma grande variedade de modelos [54].

4.2. CONSTITUIÇÃO DE UM AEROGERADOR

Os principais subsistemas que constituem um aerogerador típico estão representados na Fig. 46 e incluem [23]:

- O rotor que consiste em várias pás ligadas a um eixo (*hub*);
- A gôndola (*nacelle*) incluindo o *drive train* e o sistema de orientação *yaw*;
- O *drive train* constituído pelos eixos de baixa e alta velocidade, caixa de engrenagem, travão mecânico e o gerador elétrico;
- Os sistemas de controlo;
- A torre e a respetiva fundação;

- O sistema elétrico, incluindo cabos, comutadores, transformadores, e conversores eletrônicos de potência.

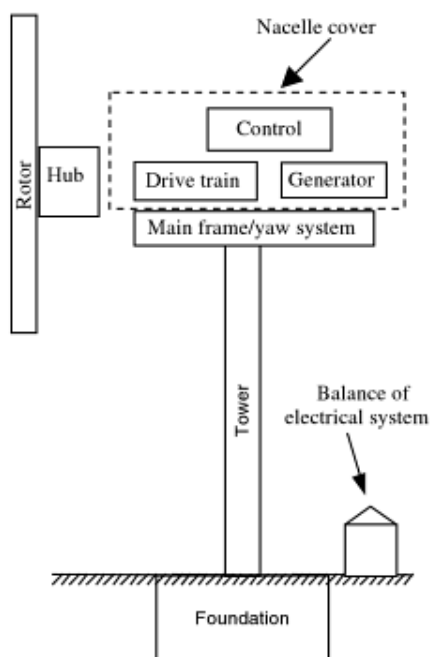


Fig. 46 - Constituição de um aerogerador de eixo horizontal [23].

De seguida descrevem-se cada um dos componentes [23]:

- O rotor inclui o eixo rotor e as pás da turbina eólica. A maior parte das turbinas apresentam duas ou três pás.
- O *drive train* inclui um eixo de baixa velocidade, no lado do rotor, uma caixa de engrenagem e um eixo de alta velocidade do lado do gerador. Outros componentes do *drive train* englobam um travão e rolamentos de suporte. A função da caixa de engrenagem é fazer aumentar a velocidade de rotação do eixo rotor para a velocidade adequada de condução do gerador. Existem turbinas que usam geradores de baixa velocidade que não requerem caixa de engrenagem.
- O gerador pode ser de indução ou síncrono. Quando o gerador está ligado diretamente à rede de eletricidade a velocidade de rotação pode ser aproximadamente constante. Se o gerador for usado com conversores eletrônicos de eletricidade, a turbina pode operar a velocidades variáveis.
- A gôndola protege os seus componentes da água. O sistema de orientação *yaw* é requerido para manter o eixo do rotor devidamente alinhado com o vento e consiste num sistema de rolamento que une a gôndola à torre. O sistema ativo de orientação *yaw* é usado em todas as turbinas *upwind* e nalgumas turbinas *downwind*. Este é controlado por um sistema automático com o seu sensor de direção de vento. O sistema passivo de *yaw*, auto alinha-se com o vento e é usado em turbinas do tipo *downwind*.
- A torre é suportada pela fundação e os principais modelos de torres são do tipo pé livre usando tubos de aço e torres de betão. Para pequena turbinas, torres

suportadas por tirantes são também usadas. A altura da torre é tipicamente de 1 a 1,5 vezes o diâmetro do rotor.

As turbinas eólicas apresentam mecanismos de proteção no caso de ventos excessivos a fim de evitar danos, que diminuem ou param a velocidade de rotação das pás. As turbinas são também desenhadas para parar automaticamente no caso de falhas como o sobreaquecimento de um gerador ou quando a turbina se desliga da rede elétrica, causando uma rápida aceleração das pás.

Estes mecanismos controlam a energia produzida ou param totalmente o funcionamento da turbina e envolvem dois sistemas de segurança independentes. O primeiro é um sistema de controlo aerodinâmico e o segundo, um travão mecânico. Este último é usado quando o travão aerodinâmico falha ou a turbina está sob reparação.

4.3. AEROGERADORES DE PEQUENA DIMENSÃO

4.3.1. INTRODUÇÃO

Tecnicamente existem várias definições de turbinas eólicas de pequena dimensão (*SWTs – Small Wind Turbines*) e vários países estabeleceram a sua própria definição de pequena turbina eólica. A discrepância do limite superior de capacidade das turbinas varia entre 15 kW e 100 kW para os cinco maiores países produtores de energia através de pequenas eólicas, como se pode observar no Quadro 2 onde se apresenta um resumo desses conceitos

Apesar das várias definições, é a definição usada na norma internacional “IEC 61400-2: *Design requirements for small wind turbines* que é largamente aceite para descrever o tamanho máximo de uma turbina eólica de pequena dimensão. A norma define as SWTs como tendo uma área de captação de energia incidente do vento (*rotor swept area*) inferior a 200 m². Esta área corresponde a um diâmetro menor ou igual a 16 m e a uma potência nominal até aproximadamente 75 kW [26].

Em Portugal de um modo geral, pode falar-se em turbinas de pequena dimensão como aquelas que são usadas para microprodução ou miniprodução, regimes de produção referidos no capítulo anterior, e no setor admite-se a seguinte classificação:

- *Micro turbinas*: Turbinas com diâmetro do rotor até, aproximadamente, 5 m, o que corresponde a uma área de captação de energia incidente do vento de, aproximadamente, 20 m² e cerca de 5 kW de potência nominal máxima.
- *Mini turbinas*: Turbinas com diâmetro rotor compreendido entre 5 m e 16 m e potência nominal superior a 5 kW e inferior a 75 kW.

Em relação ao sistema de segurança primário, no caso de turbinas de pequena dimensão, podem-se salientar os seguintes [54]:

- Mecanismo de *stall* passivo – envolve o desenho das pás de forma a que a sua velocidade de rotação e, consequentemente, a produção de energia elétrica diminuam, acima de um certo valor da velocidade de vento. Apesar de ser um mecanismo de segurança fiável, este desenho das pás resulta num pior desempenho, em termos de geração de energia, especialmente para velocidades de vento elevadas.
- Mecanismo de controlo *pitch* ativo das pás ou *furling* – permite que cada pá, individualmente, possa ser rodada em torno do seu eixo, “a favor” ou “contra” o

vento. Este é um meio eficaz de travagem, eliminando as forças de sustentação e evitando tensões nos equipamentos.

- Mecanismo de orientação passivo – Este mecanismo, referido anteriormente, pode desalinhar o rotor da direção do vento, diminuindo a velocidade de rotação das pás, através de um “cata-ventos”, que se pode observar na Fig. 48 (b).
- Flexão das pás – Algumas turbinas de pequena dimensão permitem que as suas pás sofram flexão de forma a diminuir a força de sustentação quando a velocidade do vento é elevada.

Quadro 2 - Definições de turbina eólica de pequena dimensão por vários países e instituições [37].

País / Instituição	Classificação	Potência Nominal (kW)	Características
International Electrotechnical Commission – IEC 61400-2	<i>Small Wind Turbines</i>	≈50 a 75	Área de captação de energia incidente do vento (<i>rotor swept area</i>) menor que 200 m ² , gerando energia a uma voltagem inferior a 1.000 V ou 1.500 V.
Canadá - Natural Resources Canadá - (NRCan)	<i>Mini Wind Turbine</i>	0,3 - 1	
Canadian Wind Energy Association - (CanWEA)	<i>Small Wind Turbine</i>	1 - 30	
China - Renewable Energy & Energy Efficiency Partnership (REEEP)	<i>Small Wind Turbine</i>	< 100	
	<i>Micro wind</i>	0 - 1,5	Altura: 0,5 - 5 m Produção de energia anual até 1.000 kWh
Reino Unido - Renewable UK	<i>Small wind</i>	1,5 - 15	Altura: 2 - 50 m Produção de energia anual até 50.000 kWh
	<i>Small-medium wind</i>	15 - 100	Altura: 50 - 250 m Produção de energia anual até 200.000 kWh
Reino Unido - Microgeneration Certification Scheme (MCS)	<i>Micro & Small Wind Turbine</i>	< 50	Apenas turbinas com potência inferior a 50 kW podem integrar o programa MCS.
Alemanha - Bundesverband WindEnergie (BWE)	<i>Small Wind Turbine</i>	< 75	
American Wind Energy Association (AWEA)	<i>Small Wind Turbine</i>	< 100	

Em relação ao tipo de turbina e à sua forma de funcionamento, como já foi referido anteriormente, as turbinas podem ser divididas em turbinas de eixo horizontal (HAWT) ou vertical (VAWT), dependendo da orientação do eixo rotor, como se exemplifica na Fig. 47.

Tanto as turbinas eólicas de eixo vertical como de eixo horizontal podem ser de dois tipos, *drag* ou *lift*, conforme façam uso, respetivamente, de forças de resistência aerodinâmica ou de forças de sustentação aerodinâmica, para mover o rotor.

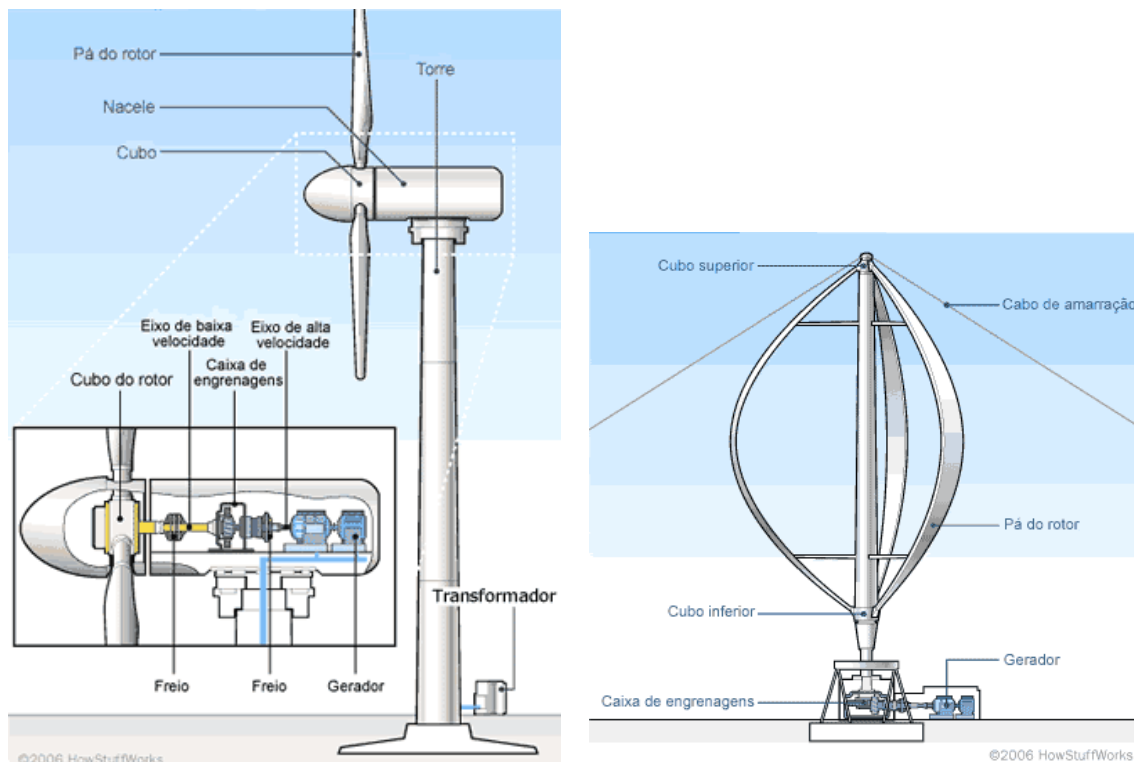


Fig. 47- Configurações de uma turbina de eixo horizontal (HAWT) e de uma turbina de eixo vertical (VAWT) [58].

Contudo, para as HAWTs, apenas os tradicionais moinhos de vento são do tipo *drag* e têm a sua velocidade naturalmente limitada à máxima velocidade do vento. Daí que estes tradicionais moinhos sejam caracterizados por movimentos de pás lentos e com grandes áreas de superfície. As HAWTs modernas são desenhadas para fazerem uso do fenómeno *lift* sendo caracterizadas por rápidos movimentos das pás com pequenas superfícies de área.

As turbinas podem ser localizadas em meio urbano, integradas em edifícios ou colocadas em edifícios já existentes e ainda isoladas em áreas públicas.

Quanto ao tipo de aplicação, as turbinas de pequena dimensão podem ser consideradas, sistemas isolados sem ligação à rede elétrica nacional e sistemas interligados à rede. As turbinas podem ainda funcionar em conjunto com outro tipo de fonte de energia como por exemplo a solar, através de painéis solares, constituindo sistemas híbridos.

4.3.2. TURBINAS DE EIXO HORIZONTAL VS. TURBINAS DE EIXO VERTICAL

As turbinas de eixo horizontal (HAWT) são o tipo de turbinas mais comuns. As HAWTs, qualquer que seja a sua dimensão, têm de se alinhar com a direção do vento de modo a funcionarem de forma mais eficiente. Existem vários conceitos de controlo de orientação, passivos ou ativos. Como já foi referido anteriormente, as HAWTs de grandes dimensões, são equipadas com um sistema ativo, que consiste num aparelho que deteta a direção do vento e um motor que ajusta o rotor para essa nova direção.

As turbinas eólicas de pequena dimensão, que interessam analisar no âmbito desta dissertação, são usualmente desenhadas com um sistema passivo. Um dos mais antigos sistemas deste tipo é a *wind vane* ou *tale vane* (cata-ventos), que se pode observar na Fig. 48 b). O “cata-ventos” tem que apresentar uma área e braço apropriados, para que no caso de uma mudança de direção do vento, seja imposta uma força de pressão no “cata-ventos” que gere um momento suficientemente grande para alinhar o rotor. Outro sistema passivo de orientação está incluído num conceito de turbina utilizado com menor frequência (turbinas auto orientáveis), o conceito *downwind* que se pode visualizar na Fig. 48 c) [52].

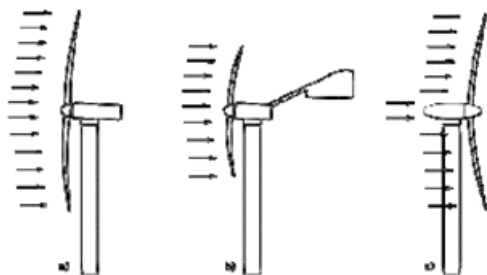


Fig. 48 - Turbinas do tipo: *upwind* com sistema de orientação ativo (a), *upwind* com sistema de orientação passivo (b) e *downwind* com sistema de orientação passivo (c) [52].

Em geral, as HAWTs podem ser divididas no tipo *upwind* e *downwind*, consoante a posição do rotor está a montante ou a jusante da torre relativamente ao sentido do vento. Na primeira situação o vento passa primeiro no rotor e depois na torre, como se pode observar na Fig. 48 a) e b), enquanto na segunda, no caso de uma turbina eólica *downwind*, se passa o inverso com o vento a passar primeiro na torre e seguidamente no rotor que se alinha com a sua direção, sem qualquer tipo de construção ou sensor adicionais [52].

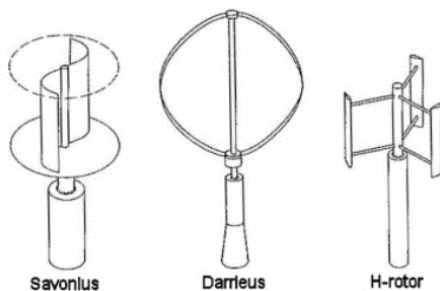


Fig. 49 - Exemplos de turbinas de eixo vertical (VAWTs) [52].

Na figura Fig. 49, apresentam-se os três principais tipos de turbinas de eixo vertical (VAWTs) modernas, cuja principal vantagem é serem omnidirecionais. As VAWTs aceitam o vento de qualquer direção. Isto simplifica o seu desenho e elimina o problema imposto pelas forças giroscópicas no rotor das turbinas convencionais quando estas se alinham com a direção do vento. O eixo rotor vertical permite ainda montar o gerador e a caixa de engrenagens junto ao solo. Como mencionado anteriormente, as VAWTs podem ser divididas em dois grandes grupos: tipo *drag*, como as Savonius e tipo *lift*. Este último grupo pode ainda ser subdividido naquelas que possuem pás retas, por exemplo, o tipo H-rotor e aquelas que usam pás curvadas, por exemplo, do tipo *Darrieus* [52].

Para as VAWTs, o tipo *lift - Darrieus* tende a dominar e a maioria das turbinas deste tipo, existentes no mercado, permite produzir mais energia por metro quadrado de “área de varrida”. Contudo as VAWTs do tipo *drag* apresentam potencial em várias situações distintas por exibirem as seguintes propriedades [54]:

- Altamente durável (Compatível com altas velocidades do vento, por exemplo, até 60 m/s (216 km/h), sem precisarem de parar);
- Baixa manutenção;
- Silenciosos (devido às baixas velocidades de rotação);
- Baixa velocidade de arranque (podem gerar energia por longos períodos);
- Visualmente mais atrativas.

Apesar das VAWTs serem omnidirecionais, dada a posição dos seus perfis e o alinhamento do eixo de rotação, estas turbinas nunca se encontram orientadas com a direção dominante do vento o que condiciona o seu desempenho máximo. Este é medido em termos de coeficiente de potência, que é calculado pela razão entre a potência útil e a potência incidente do escoamento não perturbado, verifica-se assim que a eficiência máxima de uma VAWT é cerca de 80% da eficiência máxima de uma HAWT [57].

Resumindo, as vantagens das turbinas de pequena dimensão verticais (VAWTs) em relação às horizontais (HAWTs) são [52]:

- Independentes da direção do vento;
- O gerador pode ser colocado ao nível do solo (vantagem estrutural e manutenção de fácil acessibilidade);
- Menos ruidosas;
- Turbulência e ventos de todas as direções são controlados mais efetivamente (características do meio urbano);
- Esteticamente mais agradáveis.

Enquanto as desvantagens são:

- Não arrancam sozinhas;
- São mais caras;
- Não mudam o ângulo de ataque durante uma rotação.

Na Fig. 50 podem-se observar vários modelos de turbinas de pequena dimensão de eixo vertical e de eixo horizontal existentes no mercado.



Fig. 50 – Exemplos de turbinas de pequena dimensão de eixo vertical e horizontal, existentes no mercado [59].

4.3.3. UM AEROGERADOR DE PEQUENA DIMENSÃO PORTUGUÊS

Em 2007, o INETI - Instituto Nacional de Engenharia, apresentou a primeira microturbina eólica concebida e construída em Portugal, no âmbito do projeto T.Urban, com o objetivo de integrar esta tecnologia em ambiente urbano. A T.Urban representa uma contribuição, ao nível do utilizador doméstico, para satisfazer o aumento das necessidades de energia, numa perspetiva de otimização do sistema de energia elétrica e desenvolvimento das “*Smart Grids*”, sob uma perspetiva do desenvolvimento sustentável e da utilização de recurso renováveis.

A T.Urban (Fig. 51) é uma microturbina eólica de eixo horizontal, com 2,5 kW de potência nominal, que apresenta um elevado desempenho. O diâmetro da turbina é de apenas 2,3 m que, para uma potência de 2,5 kW, equivalente a uma relação potência/área típica de turbinas de vários MW.

O sistema de controlo da T.Urban foi especificamente desenhado para operar com ligação monofásica à rede, de forma a permitir uma vasta e fácil integração em aplicações domésticas, sendo entregue com um *kit* de fácil montagem. Apresentam-se no Quadro 3 as principais características da microturbina T.Urban e na Fig. 51 uma imagem do seu protótipo, bem como a respetiva curva de potência nominal.

Quadro 3 - Características da T.Urban [60].

Modelo	T.Urban
Potência nominal	2,5 kW
Número de pás	3
Diâmetro do rotor	2,3 m
Gerado elétrico	Tipo Síncrono, com ímanes permanentes
Velocidade do rotor	Variável
Voltagem	220/240 V
Tipo de convecção	Monofásica
Velocidade de arranque	3,5 m/s (13 km/h)
Velocidade de paragem	25 m/s (90 km/h)

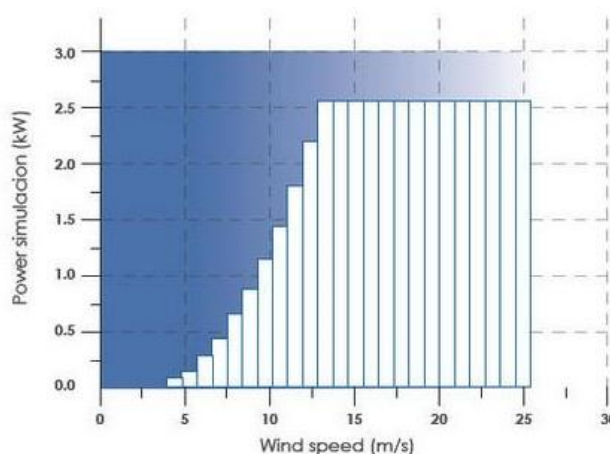


Fig. 51 - Um modelo completo da T.Urban na EWEC 2008 [52] e características de Potência nominal [60].

4.3.4. TIPOS DE APLICAÇÕES

Conforme já mencionado, as turbinas eólicas de pequena dimensão podem integrar sistemas isolados não interligados à rede elétrica, sistemas ligados à rede e ainda sistemas híbridos.

Os sistemas não interligados à rede são, normalmente, usados em lugares isolados onde não existe eletricidade ou para pequenos consumos. Estes sistemas não estão ligados à rede elétrica e requerem uma forma de armazenamento de energia que normalmente é feito através de baterias que armazenam o excesso de energia elétrica gerada para posterior utilização. É ainda necessário um controlador de carga para impedir a sobrecarga das baterias. As turbinas de pequena dimensão produzem corrente contínua, sendo necessário um inversor para a converter em corrente alternada. Na Fig. 52, esquematiza-se um sistema não interligado à rede elétrica.

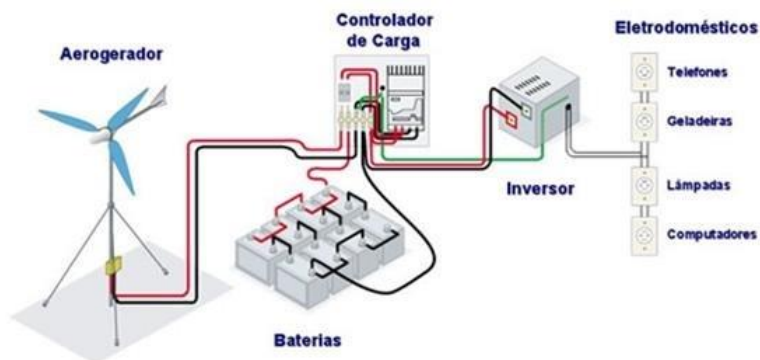


Fig. 52 - Sistema eólico isolado [61].

Os sistemas híbridos são aqueles que apresentam mais de uma fonte de energia, como por exemplo a energia solar e a energia eólica. Nestes sistemas é necessário realizar um controlo de todas as fontes, para que haja máxima eficiência e otimização dos fluxos energéticos na entrega de energia para o utilizador. O sistema híbrido também necessita de um inversor para transformar a corrente alternada produzida [61].

A Fig. 53, esquematiza um sistema híbrido de energia solar e fotovoltaica, isolado, onde os componentes associados aos números de 1 a 7, representam, respetivamente, o aerogerador, os módulos fotovoltaicos, o controlador, o inversor de carga, as baterias, o sistema de monitorização, e o equipamento de consumo elétrico. Atualmente, não é possível ligar à rede elétrica nacional energia fornecida por mais do que uma fonte de energia renovável, de acordo com o Decreto-Lei n.º 25/2013 [48], que é o caso dos sistemas híbridos.

Os sistemas interligados à rede elétrica não necessitam de armazenar energia, sendo toda a energia produzida injetada na rede elétrica nacional. É apenas necessário um inversor, que transforma a corrente produzida pelas turbinas eólicas em corrente compatível com a rede elétrica, como se pode observar na Fig. 54 [61].

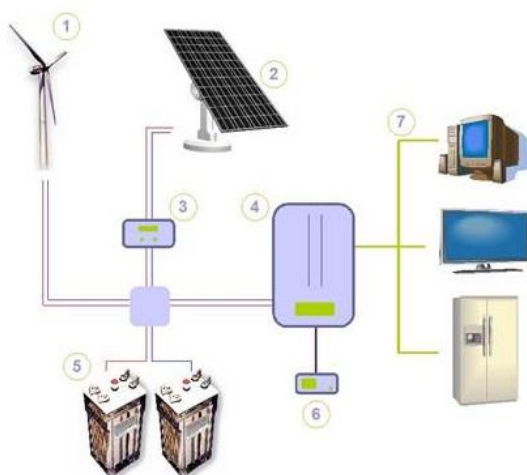


Fig. 53 - Sistema Híbrido de energia eólica e solar [adaptado de [62]]

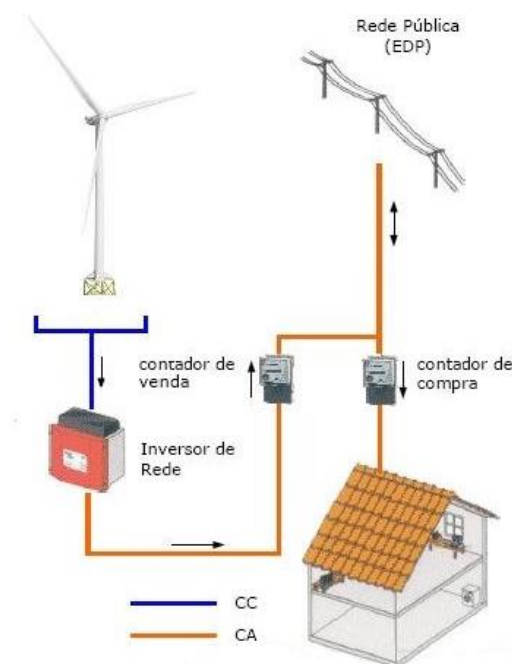


Fig. 54 - Sistema eólico interligado à rede elétrica [adaptado de [63]]

As turbinas eólicas de pequena dimensão podem localizar-se em meio urbano, sendo a maior parte das turbinas montadas em edifícios já existentes ou integradas em edifícios que foram dimensionados e construídos tendo em atenção a futura utilização de turbinas eólicas. Podem ainda, ser montadas em torres, no solo, em espaços públicos ou perto do edifício ao qual fornecem energia. Na Fig. 55, apresentam-se exemplos de opções genéricas de turbinas eólicas integradas em edifícios e montadas no topo de edifícios.



a)



b)

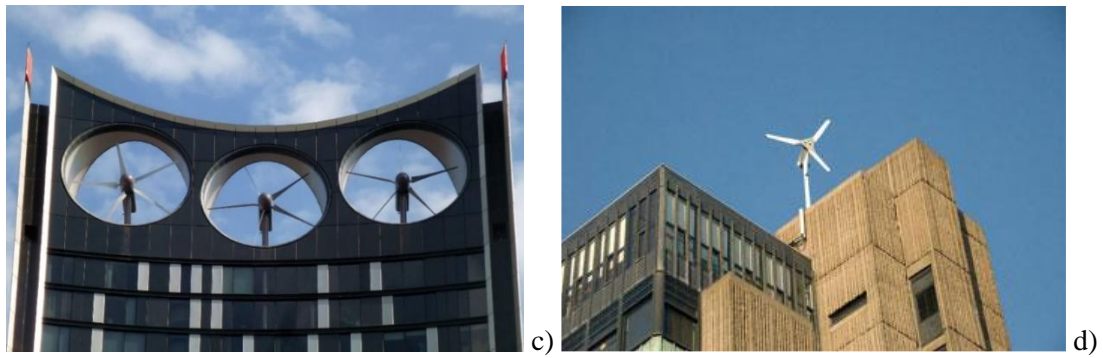


Fig. 55 - Exemplo de turbinas eólicas integradas em edifícios em a) Manama b) Dubai c) Londres d) Glasgow [54].

5

RUÍDO DE AEROGERADORES

5.1. INTRODUÇÃO

Um dos entraves à aceitação da instalação de aerogeradores é o facto de estes serem percebidos como ruidosos. Além do potencial eólico do local, caracterizado no capítulo 3, o ruído emitido por aerogeradores é outra consideração a ter em conta na determinação da localização de aerogeradores de pequenas e grandes dimensões. Contudo, como os aerogeradores de pequenas dimensões são localizados perto do local ao qual fornecem energia, tal significa que estão, normalmente, próximos de pessoas e outros recetores sensíveis, aumentando o seu potencial de incomodidade sonora. Isto leva a que a avaliação do ruído seja um dos aspetos mais importantes a ter em conta na localização de um aerogerador de pequena dimensão.

5.2. FONTES DE RUÍDO DE AEROGERADORES

As fontes de ruído emitidas pelos aerogeradores podem ser divididas em duas categorias:

- Fontes de ruído mecânico;
- Fontes de ruído aerodinâmico.

O ruído mecânico resulta do movimento e da interação dos componentes dos aerogeradores e os sons aerodinâmicos são originados por fenómenos de escoamento de ar em redor das diferentes partes das pás.

Os aerogeradores podem produzir uma vasta variedade de níveis sonoros e frequências, dependendo do desenho da pá, do tipo de torre e da complexidade dos seus componentes mecânicos. O desenho das pás é determinado pelo fabricante enquanto o tipo de torre é tipicamente escolhido pelo utilizador [64].

O ruído produzido pelos aerogeradores tem vindo a diminuir, com o avanço e desenvolvimento da tecnologia. Até 1990, ambas as fontes de ruído (mecânica e aerodinâmica) contribuíam de forma significativa para o ruído emitido pelos aerogeradores. Contudo, o amortecimento das vibrações e o aperfeiçoamento do desenho dos componentes mecânicos contribuíram para reduzir o ruído proveniente de fontes mecânicas. O perfil alar das pás, tem-se tornado mais eficiente, havendo mais energia eólica convertida em energia rotacional e menos em energia acústica [65].

Atualmente, o ruído aerodinâmico é, normalmente, a componente dominante no ruído de aerogeradores e torna-se ainda mais relevante com o aumento da sua dimensão, uma vez que o ruído mecânico não aumenta tão rapidamente, com o aumento da dimensão dos aerogeradores, como o aerodinâmico [66].

5.2.1. FONTES DE RUÍDO MECÂNICO

As fontes de ruídos mecânicos incluem componentes como a caixa de engrenagem, o gerador, os mecanismos de orientação (*yaw*), sistemas de arrefecimento, bem como equipamento hidráulico e elétrico. Os ruídos mecânicos são originados pelo movimento relativo dos componentes mecânicos e pela sua resposta dinâmica, como por exemplo o ruído produzido pelas engrenagens e pelo eixo de alta velocidade [67].

Uma vez que o ruído está associado à rotação do equipamento mecânico e elétrico, este tende a ser tonal, apesar de possuir componentes de banda larga. Por exemplo, os sons tonais puros podem ser emitidos nas frequências de rotação de eixos, geradores e engrenagens. Além disto, o rotor e a torre podem atuar como “alto-falantes”, transmitindo o som mecânico e difundindo-o. O som pode ser transmitido através do ar, sendo diretamente propagado, desde a superfície ou interior do componente para o ar, ou ainda transmitido através dos componentes estruturais antes de ser emitido para o ar [65]. Na Fig. 56, apresentam-se os níveis de potência sonora (L_w) associados a cada componente de uma dada turbina eólica.

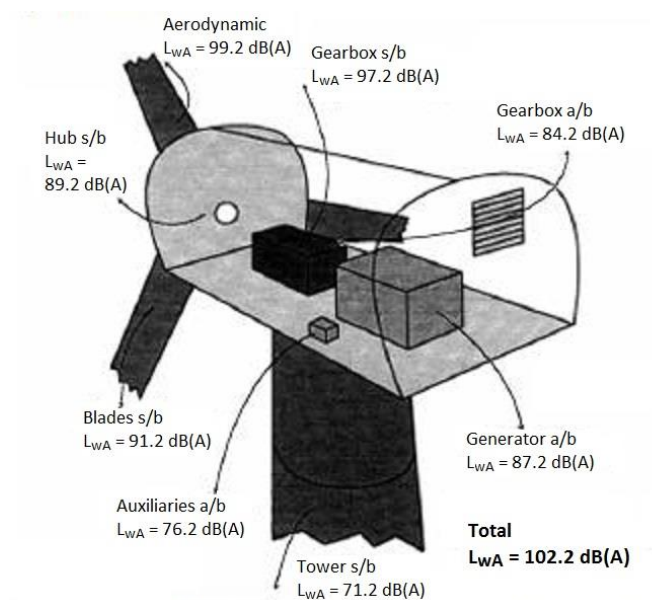


Fig. 56 - Componentes e nível de potência sonora de uma turbina eólica e respetivos caminhos de transmissão de ruído: o ar (a/b) e os componentes estruturais (s/b) [65].

O ruído mecânico, em geral, não é um problema para os aerogeradores de pequena dimensão, uma vez que, a maior parte não apresenta caixa de engrenagem e, conseqüentemente apresenta menos componentes que se movem ou outros componentes mecânicos ruidosos.

Qualquer ruído mecânico existente é, normalmente, eliminado ou reduzido para um nível mais baixo que o nível de ruído aerodinâmico, principalmente, através de melhoramentos no desenho mecânico.

Ocasionalmente podem ser ouvidos ruídos mecânicos devido a falhas, por exemplo nos rolamentos ou de partes eletromecânicas, uma vez que, no caso dos pequenos aerogeradores, se situam perto do aerogerador [3].

5.2.2. FONTES DE RUÍDO AERODINÂMICO

As fontes de ruído aerodinâmico que contribuem para as emissões do ruído total de um aerogerador, são resultado do desenho da pá e do tipo de torre usada [64].

O ruído aerodinâmico é de banda larga, com uma ligeira concentração nas baixas frequências e aumenta, geralmente, com o aumento da velocidade de rotação das pás, podendo-se dividir nos seguintes tipos de ruído [65]:

- Ruído da turbulência do fluxo (*Inflow Turbulence Sound*) – Depende da quantidade de turbulência atmosférica, que resulta em forças locais ou em flutuações de pressão em redor das pás.
- Ruído próprio da pá (*Airfoil Self Noise*) - Som gerado pelo fluxo de ar, diretamente ao longo da superfície da pá.

Na Fig. 57, ilustram-se vários tipos de escoamento, relacionados com várias partes da pá de um aerogerador.

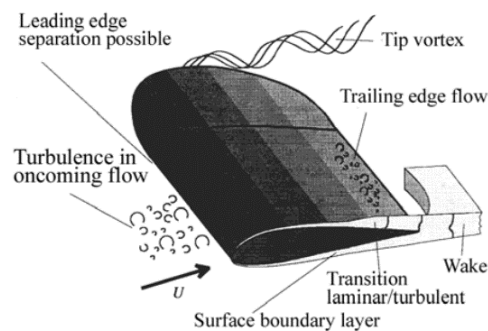


Fig. 57 - Ruído aerodinâmico [68].

Uma representação esquemática, do ruído aerodinâmico devido à interação das pás com a turbulência atmosférica natural, o ruído da turbulência do fluxo, pode ser observada na Fig. 58. Em condições atmosféricas instáveis, a pá encontra remoinhos de ar turbulentos, que exercem forças instáveis na pá. A camada limite atmosférica caracteriza-se por padrões de escoamento que se alteram constantemente, o que torna difícil prever o comportamento da turbulência atmosférica natural e, conseqüentemente quantificar o ruído da turbulência do fluxo [3].

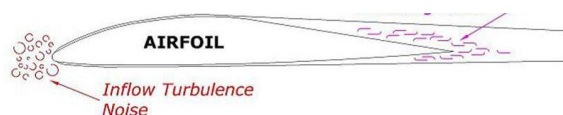


Fig. 58 - Ruído da turbulência do fluxo [3].

O ruído próprio da pá, provocado pela turbulência na camada limite das pás, pode dividir-se nos seguintes tipos de ruído [3]:

- Ruído do vórtice da extremidade da pá (*tip vortex formation noise*) – Ocorre quando se formam vórtices, que se propagam e interagem com o bordo de fuga (*trailing edge*) da pá, resultando em ruído. Este ruído apresenta frequências de banda larga.

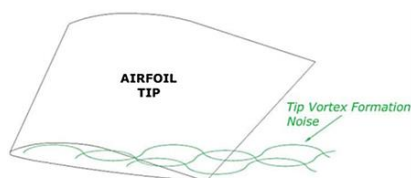


Fig. 59 - Ruído do vórtice da extremidade da pá [3]

- Ruído do mecanismo de controlo *stall* (*Separation Stall Noise*) - O mecanismo de controlo *stall* provoca a separação da camada limite da superfície da pá, causando um escoamento instável, o que provoca a emissão de ruído que apresenta frequências de banda larga.

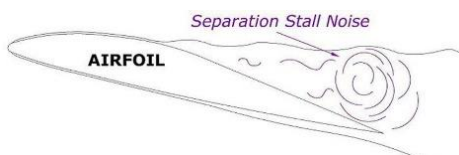


Fig. 60 – Ruído provocado pelo mecanismo de controlo *stall* [3].

- Ruído do vórtice na camada limite laminar (*Laminar Boundary Layer Vortex Shedding Noise*) – Instabilidades na camada limite laminar podem formar vórtices que se propagam ao longo da pá e interagem com o bordo de fuga, causando ruído com componentes tonais.



Fig. 61 - *Laminar Boundary Layer Vortex Shedding Noise* [3]

- Ruído de Bordo de Fuga – Este ruído divide-se em dois tipos de ruído de natureza distinta: O ruído devido ao efeito do formato embotado do bordo de fuga da pá (*Blunt Trailing Edge Noise*) e o ruído devido à interação da turbulência existente na camada limite com o bordo de fuga da pá (*Turbulent Boundary layer Trailing Edge Noise*). O primeiro ruído pode apresentar componentes tonais, enquanto o segundo apresenta componentes de banda larga no espectro sonoro. Ambos estão representados na Fig. 62.



Fig. 62 – Ruído de bordo de fuga da pá [3].

Outro tipo de ruído aerodinâmico é o ruído de interação das pás com a torre.

O escoamento do ar atmosférico é “perturbado” quando passa pela torre do aerogerador, em ambos os lados desta, relativamente à direção do vento. Quando as pás encontram este ar “perturbado”, ocorre uma mudança rápida nas forças que atuam nas pás, causando um ruído de baixa frequência, que se percebe como um “som de batimento” (*thumping*) cada vez que as pás passam a torre [3].

Este tipo de ruído é pouco importante para os aerogeradores de pequena dimensão, uma vez que, as torres apresentam um diâmetro relativamente pequeno que perturba pouco o escoamento do ar. Como as pás de pequenos aerogeradores rodam a velocidades mais elevadas, o “som de batimento” (*thumping*) pode estar presente como uma fonte de som de frequência mais alta.

Outra fonte de ruído, proveniente de aerogeradores de pequena dimensão, com potencial para causar incomodidade, são as vibrações presentes quando as pás se encontram em rotação. Os aerogeradores mais pequenos ao rodar a velocidades elevadas têm potencial para causar vibrações significativas. Uma vez que muitas turbinas são montadas diretamente na estrutura do edifício ao qual fornecem energia, de uma forma que é insuficiente para amortecer todas as vibrações, tal significa que estas podem ser propagadas através da estrutura, sendo ouvidas como um som “sussurrante” contínuo.

No caso de pequenos aerogeradores montados numa torre isolada, mas junto de edifícios, as vibrações podem ser também transmitidas para o edifício, através da torre e das fundações [3].

Naturalmente, os mecanismos de ruído acima descritos, que contribuem para o ruído global do aerogerador, não apresentam o mesmo grau de importância. Contudo, para este trabalho e apesar de ser relevante conhecer o processo de formação do ruído global, não interessa avaliar, individualmente, o ruído dos diferentes componentes da turbina, mas sim caracterizar o potencial de incomodidade geral do ruído total emitido pelo aerogerador.

Não existe grande diferença entre os níveis de ruído das turbinas eólicas de eixo horizontal e de eixo vertical, embora as turbinas de eixo vertical sejam geralmente definidas como mais silenciosas pelas seguintes razões [53]:

- As pás não criam o usual ruído de “sussurro/zumbido” que ocorre com as HAWTs
- As VAWTs usualmente operam a velocidades mais baixas.

5.3. RUÍDOS ESPECÍFICOS DE TURBINAS EÓLICAS DE PEQUENA DIMENSÃO

No que se refere às turbinas eólicas de pequena dimensão, o ruído emitido está associado mais especificamente aos seguintes fatores [69]:

- Estremecer das pás;
- *Furling* como meio de controlo de velocidade;

- Potencial de ruído da estrutura de suporte.

Tipicamente, os únicos componentes que se movem são o gerador, o sistema de orientação *yaw* e o mecanismo de *furling*. Quando as turbinas estão em processo de *furling*, os níveis sonoros podem aumentar momentaneamente.

A não existência de caixa de engrenagem significa menos ruído, contudo, isto faz destas turbinas aparelhos de velocidades variáveis, resultando em maiores velocidades de rotação das pás e mais ruído aerodinâmico, pelo que este se constitui a maior fonte de ruído das pequenas turbinas eólicas.

Outra razão para os níveis de ruído de pequenas turbinas ainda serem mais elevados é o facto de se ter vindo a gastar mais dinheiro em investigação para reduzir o ruído de turbinas eólicas de grande dimensão, do que para as de pequena escala, não se tendo produzido avanços tecnológicos tão significativos [68].

O ruído de vórtice da extremidade da pá (*tip vortex noise*), como já foi referido, contribui para as emissões acústicas aerodinâmicas, apresentando frequências de pico específicas que dependem da forma geométrica da ponta das pás. Na Fig. 63, apresentam-se dois exemplos de turbinas eólicas de pequena dimensão com terminações de pás distintas. Na primeira turbina o fabricante utilizou uma forma pontiaguda, que “perturba” menos ar, contudo tem maior emissão acústica de banda estreita, que contém um conjunto mais discreto de frequências, tornando-a mais perceptível ao ouvido humano, enquanto a segunda turbina possui a ponta das pás em forma quadrada, com uma banda de emissão sonora mais larga que o primeiro modelo e uma maior contribuição para o nível de pressão sonora total [64].



Fig. 63 - Exemplos de turbinas eólicas de pequena dimensão [64].

5.4. CARACTERÍSTICAS DO RUÍDO DE AEROGERADORES

Como se constatou no ponto anterior, a emissão sonora proveniente do funcionamento das turbinas eólicas de pequena dimensão tem diversos pontos de origem que contribuem de forma distinta para as suas características sonoras finais.

Nesse contexto, os ruídos gerados pelas diversas componentes das turbinas eólicas em operação podem ser caracterizados como: tonais, de banda larga, com predominância de baixas frequências e impulsivos [65]:

- Tonal – quando apresenta frequências discretas. É causado pelo movimento de engrenagens, instabilidades não aerodinâmicas a interagirem com a superfície das pás ou ainda escoamentos instáveis sobre orifícios, fendas e no perfil embotado do bordo de fuga da pá. (Fig. 57).
- De banda larga – se tem uma distribuição contínua da pressão sonora em frequências superiores a 100 Hz. Em geral deve-se à interação das pás da turbina com a turbulência atmosférica e é também descrito como sons característicos de “sibilamento” ou “sussurro/zumbido”.
- Com predominância de baixas frequências – se dominam as frequências compreendidas entre 20 e 100 Hz, normalmente associado a rotores do tipo *downwind*. É produzido quando as pás encontram deficiências localizadas no escoamento devido ao fluxo em redor da torre ou a mudanças de velocidade de vento ou rastros deixados por outros aerogeradores.
- Impulsivo – quando é descrito por pequenos impulsos acústicos ou “sons de impacto”, que variam em amplitude, ao longo do tempo. É provocado pela interação das pás com o fluxo de ar “perturbado” atrás da torre de um aerogerador do tipo *downwind*.

Antigamente predominavam os aerogeradores do tipo *downwind*, com uma forte componente de ruído de baixas frequências. Em contraste, os aerogeradores modernos são do tipo *upwind* e o ruído mais comum é o de banda larga.

5.5. PERCEÇÃO DO RUÍDO

A percepção do ruído está associada à “interpretação” que o ouvinte/recetor atribui ao estímulo sonoro que recebe. No caso dos aerogeradores e independentemente do ruído que emitem, um número significativo de pessoas acredita que os aerogeradores são ruidosos, como se pode constatar na Fig. 64, onde se mostra como os aerogeradores podem incomodar as pessoas [2].

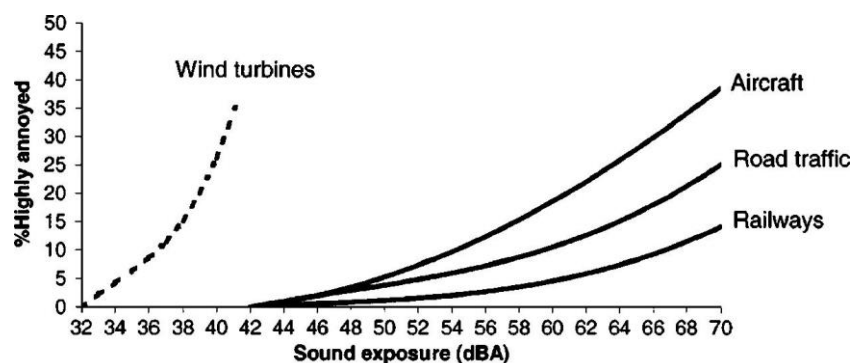


Fig. 64 – Incomodidade associada a várias fontes sonoras [2].

A Fig. 64 apresenta a percentagem de pessoas incomodadas pelo ruído de aerogeradores, comparada com a percentagem que se manifesta incomodada devida ao ruído de tráfego aéreo, rodoviário e ferroviário. Pode-se verificar, que o ruído de tráfego rodoviário, aéreo e ferroviário são percebidos como ruído, que provoca incomodidade, a níveis de pressão sonora mais elevados,

quando comparados com as turbinas eólicas, ou seja, as pessoas revelam-se muito mais suscetíveis à incomodidade sonora causada pelos aerogeradores, mesmo que o nível de exposição a que estão sujeitas seja manifestamente inferior.

Ou seja, estes níveis sonoros, apesar de “baixos”, podem ser “ruidosos” no sentido em que o ruído é um som indesejado, particularmente se, como vimos em pontos anteriores, está concentrado em determinadas frequências ou apresenta características tonais [70]. Na Fig. 65 apresenta-se o nível de pressão sonora, para turbinas eólicas de pequena dimensão, medido a aproximadamente 30 m de distância da mesma, comparando-o com níveis de pressão sonora provenientes de outro tipo de fontes [71],.

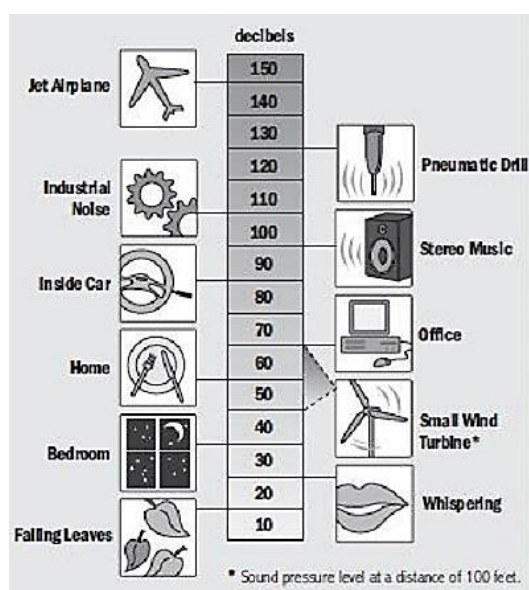


Fig. 65 - Níveis de pressão sonora de várias fontes e de uma turbina de pequena dimensão [71].

Generalizando, os efeitos do ruído nas pessoas, independentemente da sua origem, podem ser classificados em três categorias [65]:

- Efeitos subjetivos incluindo incomodidade, transtorno, insatisfação;
- Interferência com atividades como o discurso, sono e aprendizagem;
- Efeitos fisiológicos como ansiedade, zumbidos ou perda de audição.

Os aerogeradores mais recentes, que incorporam inovações tecnológicas suscetíveis de reduzir as emissões sonoras produzem, geralmente, apenas os efeitos da primeira categoria mencionada.

Se um som é incomodativo, tal depende das suas características (tonal, de banda larga, com predominância de baixas frequências ou impulsivo) e das circunstâncias e sensibilidade da pessoa que o ouve. Devido à larga variação nos níveis de tolerância individual em relação ao ruído, não existe uma forma, completamente satisfatória, de medir os efeitos subjetivos ou as correspondentes reações de incomodidade e insatisfação [65].

No caso das turbinas eólicas, o ruído gerado que é percebido numa dada localização, é condicionado por vários fatores: o tipo de fonte sonora, as características do percurso de propagação e a localização dos recetores, que se apresentam esquematizados na Fig. 66.

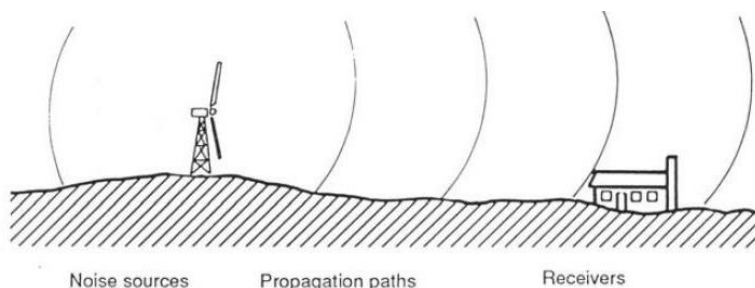


Fig. 66 – Propagação do ruído de aerogeradores [65].

As fontes de ruído, no caso de um aerogerador, dependem do respetivo modelo, enquanto a distância, os gradientes de vento, a absorção e a rugosidade do terreno e a presença de obstáculos têm influência na propagação do ruído emitido ao longo do percurso entre a fonte e o recetor. Ao nível do recetor, deve-se ter em conta a influência do ruído ambiente e a posição relativa do recetor no interior ou no exterior de um edifício.

5.6. LICENCIAMENTO DE AEROGERADORES DE PEQUENA DIMENSÃO

Na maior parte dos países europeus existe legislação específica para avaliar os efeitos ambientais de grandes parques eólicos, nomeadamente no que se refere aos níveis de ruído máximos permitidos e existem diretrizes e recomendações para a avaliação e medição do ruído emitido. Estes parques localizam-se em áreas menos urbanas onde o ruído ambiente é mais reduzido, ($< 40 \text{ dB(A)}$), contrastando com meio urbano, onde usualmente se implantam as turbinas de pequena dimensão, em que o ruído de fundo é usualmente mais elevado podendo, nalguns momentos ou situações, atingir valores superiores a 65 dB(A) .

A falta de precedentes para a localização de turbinas em áreas residenciais e urbanas leva a que as condições de licenciamento não estejam tão sistematizadas, baseando-se na regulamentação geral de ruído existente [54].

Como anteriormente mencionado, o ruído de uma turbina eólica pode ser quantificado de duas maneiras: através do nível de potência sonora, medida da força acústica da própria turbina eólica e através do nível sonoro percebido numa dada localização, num recetor a uma dada distância da turbina eólica.

Um aspeto a ter em conta, na avaliação deste tipo de ruído é o facto de, não ser só o ruído das turbinas eólicas que aumenta com o aumento a velocidade do vento. Também o ruído residual, devido à interação do vento com a vegetação, animais, obstáculos ou a qualquer outra fonte sonora sofre um incremento. O ruído residual pode ser quase tão ruidoso como a turbina eólica, e para algumas velocidades pode até mascarar o ruído emitido pela própria turbina eólica [71].

A uniformização e simplificação dos procedimentos de emissão de licenças de construção e exploração para sistemas de energia eólica de pequenas dimensão é essencial para que esta fonte de energia limpa possa ser utilizada de forma eficaz, tanto em termos de custos como de oportunidade. Contudo, a legislação relativa a unidades de pequena produção de energia eólica é escassa a nível nacional e mundial.

Em Portugal, não existe legislação específica que reúna um conjunto de regras a ter em conta quando se instala uma unidade de micro ou miniprodução de energia eólica, existindo apenas

legislação geral acerca dos procedimentos a efetuar para se proceder à instalação de uma unidade de produção de energia elétrica, ligada à Rede Elétrica de Serviço Público (RESP). Neste subcapítulo pretende-se descrever a forma como os aerogeradores urbanos se encaixam nos procedimentos de planeamento urbano, em termos de licenciamento, em Portugal e a nível internacional, bem como identificar pontos em comum nos critérios usados e nas barreiras relativamente à instalação destas turbinas.

5.6.1. LEGISLAÇÃO PORTUGUESA

Em Portugal o licenciamento de aerogeradores de pequena dimensão insere-se na legislação relativa à micro e mini produção de energia referida no subcapítulo 3.6.3., nomeadamente os Decretos-Lei n.º 373/2007 [47] e n.º 34/2011 [46], republicados pelo Decreto-Lei n.º 25/2013 [48], que regulam o acesso à atividade de micro e mini produção, respetivamente.

Relativamente à instalação de aerogeradores destinados ao autoconsumo e sem ligação à RESP, não regulados pelos decretos-lei supracitados, não é exigida, de forma geral, qualquer tipo de licença ou pedido de autorização para instalar um aerogerador em propriedade privada. Segundo informações recolhidas junto de instaladores deste tipo de equipamentos, é conveniente que a sua instalação seja feita por uma empresa que comercialize aerogeradores homologados, que normalmente apresentam níveis de emissão sonora mais reduzidos.

O processo de licenciamento de um aerogerador ligado à RESP começa com o registo, pelo produtor, da unidade de produção no portal “Renováveis na Hora” [51].

A gestão do SRM-Sistema de Registo da Microprodução é uma das atividades atribuída à CERTIEL pela Direção Geral de Energia e Geologia (DGEG).

Complementando essa gestão, a CERTIEL certifica, do ponto de vista técnico, as unidades de microprodução, isto é, valida o cumprimento dos requisitos de segurança exigíveis a uma instalação com especificidades próprias, validando igualmente os equipamentos instalados relativamente aos registados no SRM.

A CERTIEL procede igualmente à certificação das instalações de miniprodução ligadas à rede de baixa tensão, sendo que as ligadas às redes de alta ou de média tensão são certificadas pelas Direções Regionais de Economia – DRE.

O procedimento de registo inicia-se com a inscrição do promotor, seguindo-se a fase de aceitação desta e termina com a atribuição de potência de ligação, tornando-se definitivo com a emissão do respetivo certificado de exploração, a disponibilizar também no SRM ou SRMini, após a instalação da unidade de produção pelo produtor. De seguida, o produtor adere a um contrato de compra e venda de eletricidade e o comercializador de último recurso avisa o operador da rede de distribuição para proceder à ligação da unidade de microprodução à RESP, dando conhecimento ao SRM ou SRMini.

As unidades de microprodução e miniprodução ficam sujeitas à monitorização e controlo pela entidade responsável pelo SRM ou SRMini, de forma a verificar as condições de proteção da interligação com a RESP e as características da instalação previstas no registo.

Relativamente ao ruído emitido, estas instalações estão sujeitas apenas à regulamentação de ruído ambiente geral, de acordo com o portal “Renováveis na Hora”, onde se pode ler: *Estão estabelecidas distâncias mínimas a respeitar para a instalação de aerogeradores? Não estão estabelecidas distâncias mínimas. Os promotores deverão verificar, caso a caso, se a instalação*

do aerogerador cumpre os requisitos estabelecidos no Regulamento Geral de Ruído (Decreto-Lei n.º 9/2007, de 17 de janeiro).

Em Portugal, como já foi referido, é o Decreto-Lei n.º 9/2007, de 17 de Janeiro: Regulamento Geral do Ruído (RGR) [12], que regula o ruído ambiente e avalia a incomodidade sonora.

O RGR estabelece o regime de prevenção e controlo da poluição sonora, visando a salvaguarda da saúde humana e o bem-estar das populações e aplica-se às atividades ruidosas permanentes e temporárias e a outras fontes de ruído suscetíveis de causar incomodidade. Em relação à regulação da produção de ruído o RGR define dois critérios, o *critério de exposição* e o *critério de incomodidade*.

O *critério de exposição* consiste no cumprimento de valores limite para os indicadores de ruído em função da classificação acústica atribuída à zona em causa. Estes limites, definidos no RGR encontram-se indicados no Quadro 4 para os indicadores que constam do atual RGR assim como das diretivas europeias em vigor, nomeadamente L_n e L_{den} , cuja determinação se faz pela expressão 8.

$$L_{den} = 10 * \log \left[\frac{1}{24} \left(13 * 10^{\frac{L_d}{10}} + 3 * 10^{\frac{L_e+5}{10}} + 8 * 10^{\frac{L_n+10}{10}} \right) \right] \quad (8)$$

sendo L_{den} - Indicador de ruído diurno-entardecer-noturno - é o indicador de ruído, expresso em dB(A), associado ao incómodo global

L_d - “Indicador de ruído diurno” - é o nível sonoro médio de longa duração, conforme definido na Norma NP1996-1, determinado durante uma série de períodos diurnos (7 - 20h) representativos de um ano.

L_e - “Indicador de ruído do entardecer” - é o nível sonoro médio de longa duração, conforme definido na Norma NP 1996-1, determinado durante uma série de períodos do entardecer (20 – 23 h) representativos de um ano.

L_n - “Indicador de ruído noturno” é o nível sonoro médio de longa duração, conforme definido na Norma NP 1996-1, determinado durante uma série de períodos noturnos (23 – 7 h) representativos de um ano.

Quadro 4 - Limites máximos de Exposição em Função da Classificação de Zonas, de acordo com o RGR [8].

Classificação de Zonas	L_{den} dB(A)	L_n dB(A)
Zonas Mistas	65	55
Zonas Sensíveis	55	45
Zonas Sensíveis na proximidade de GIT existente	65	55
Zonas Sensíveis na proximidade de GIT não aéreo em projeto	60	50
Zonas Sensíveis de GIT aéreo em projeto	65	55
Recetores Sensíveis em Zonas ainda não classificadas	63	53

De acordo como estipulado no RGR, a classificação acústica do território reparte-se em Zonas Sensíveis e Mistas, correspondendo uma Zona Sensível à “área definida em plano municipal de

ordenamento do território como vocacionada para uso habitacional, ou para escolas, hospitais ou similares, ou espaços de lazer, existentes ou previstos, podendo conter pequenas unidades de comércio e de serviços destinadas a servir a população local, tais como cafés e outros estabelecimentos de restauração, papelarias e outros estabelecimentos de comércio tradicional, sem funcionamento no período noturno”, e uma Zona mista à “área definida em plano municipal de ordenamento do território, cuja ocupação seja afeta a outros usos, existentes ou previstos, para além dos referidos na definição de zona sensível”. Enquanto os municípios não aprovarem a classificação acústica do território, “aplicam-se aos recetores sensíveis os valores limites de L_{den} igual ou inferior a 63 dB(A) e L_n igual ou inferior a 53 dB(A)” [12].

A sigla GIT diz respeito a Grandes Infraestruturas de Transporte que se refere “a instalação e meios destinados ao funcionamento de transporte aéreo, ferroviário ou rodoviário”, nomeadamente:

- GIT aéreo - Aeroporto civil com tráfego > 50 000 movimentos anuais;
- GIT ferroviário - Troços de via-férrea com > 30 000 passagens de comboios anuais;
- GIT rodoviário - Troço de estrada com > três milhões de passagens de veículos anuais.

A instalação e o exercício de atividades ruidosas permanentes em zonas Mistas ou Sensíveis, nas envolventes destas ou na proximidade dos recetores Sensíveis isolados estão sujeitos ao cumprimento dos valores limite fixados (L_{den} e L_n), e ao cumprimento do critério de incomodidade. Este critério apenas se aplica se o L_{Aeq} do ruído particular for superior a 27 dB no interior dos edifícios e 45 dB no exterior.

O *Critério de Incomodidade* é “considerado como a diferença entre o valor do indicador L_{Aeq} do ruído ambiente determinado durante a ocorrência do ruído particular da atividade ou atividades em avaliação e o valor do indicador L_{Aeq} do ruído residual” [12]. Esta diferença, a menos das correções devidas às características tonais (K_{tonal}) ou impulsivas ($K_{impulsivo}$) do ruído em avaliação, conforme o indicado na equação 9, não pode exceder:

- 5 dB(A) no período diurno;
- 4 dB(A) no período entardecer;
- 3 dB(A) no período noturno.

$$\begin{aligned} & (L_{Aeq \text{ ruído particular}} + K_{tonal} + K_{impulsivo}) - L_{Aeq \text{ ruído residual}} \\ & \leq 3 \text{ (4 ou 5)} + D \end{aligned} \quad (9)$$

A constante K_{tonal} toma o valor de 3 dB(A) quando o ruído for tonal, isto é, se pelos pelo menos uma banda de 1/3 de oitava sobressair em pelo menos 5 dB em relação às duas bandas adjacentes, na gama dos 50 Hz aos 8000 Hz e avaliado com filtro A.

A constante $K_{impulsivo}$ é igual a 3 dB(A) quando o ruído for considerado impulsivo, isto é, se a diferença entre o nível sonoro contínuo equivalente, L_{Aeq} , medido em simultâneo com característica *impulsiva* e *fast* ($L_{AIm} - L_{Aeq}$), for superior a 6 dB(A).

Os valores 3, 4 ou 5 dB(A) da expressão 9 são usados, respetivamente, para os períodos noturno, entardecer e diurno. O parâmetro D é escolhido de acordo com a percentagem q do tempo de emergência do ruído perturbador, sendo q a relação percentual entre a duração acumulada de ocorrência do ruído particular e a duração total do período de referência em causa e apresenta os valores constantes no Quadro 5.

Quadro 5 - Valores de D em função da percentagem de tempo de emergência, q [8].

Períodos	Diurno e/ou Entardecer	Noturno até às 24h	Noturno depois das 24h
$q \leq 12,5\%$	4	3	2
$12,5\% < q \leq 25\%$	3	Não possível	2
$25\% < q \leq 50\%$	2	Não possível	2
$50\% < q \leq 75\%$	1	Não possível	1
$q > 75\%$	0	Não possível	0

Caso o cumprimento dos valores limite de exposição e de incomodidade não seja conseguido devem ser adotadas as medidas necessárias, de acordo com a seguinte ordem de prioridade de atuação:

- Medidas de redução na fonte de ruído;
- Medidas de redução no meio de propagação de ruído;
- Medidas de redução no recetor sensível.

5.6.2. LEGISLAÇÃO INTERNACIONAL

5.6.2.1. Estados Unidos da América - Califórnia

A *American Wind Energy Association's small Wind Advocate Team*, em cooperação com a *Northwest Sustainable Energy for Economic Development*, desenvolveu o guia *Permitting Small Wind Turbines: A handbook – Learning from California experience* [71], em 2003, que consiste num conjunto de boas práticas relativamente à instalação de sistemas eólicos de pequena dimensão, onde são citadas as principais disposições da lei “AB 1207” (AB 1207, *Longville - Small Wind Energy Systems*), descritas as condições em que os condados da Califórnia devem cumprir esta lei e os passos que os municípios tomaram e podem vir a tomar para agilizar o processo de licenciamento de turbinas eólicas de pequena dimensão, usando exemplos de instalações existentes. É um guia útil para compreender as implicações de licenciamento da nova lei da Califórnia e para que as entidades públicas ganhem um melhor conhecimento destes sistemas e os proprietários percebam o que esperar do processo de licenciamento.

A primeira secção cobre as considerações dos locais, listando os fatores que determinam se o local é adequado, onde posicionar a turbina e que impactes a turbina poderá ter nas propriedades vizinhas, na vida selvagem e na segurança. A secção seguinte descreve as disposições fundamentais da lei AB 1207 e ilustra como tem sido aplicada em condados específicos ao longo da Califórnia. A terceira secção apresenta o regulamento relativo ao modelo de zonamento recomendado pela *American Wind Association* (AWEA) e uma lista com as melhores práticas de licenciamento de pequenas turbinas eólicas tanto na Califórnia, como em todo o país. A secção final descreve uma variedade de publicações de agências governamentais e organizações, bem como uma lista de fabricantes de pequenas turbinas eólicas.

Relativamente ao ruído, de acordo com a lei da Califórnia, as turbinas eólicas de pequena dimensão, em regime de funcionamento normal, não devem produzir um nível de pressão sonora superior a 60 dB(A), medidos junto à habitação vizinha mais próxima. Contudo, este nível pode

ser excedido durante eventos de curto prazo, como cortes de energia elétrica e tempestades de vento severas.

A AWEA possui regulamentação com o objetivo de ajudar as entidades locais a atualizar a regulamentação relativa a pequenas instalações de turbinas eólicas, como o regulamento *Model Zoning Ordinance: Permitted Use Regulation for Small Wind Turbines*. Na seção quatro desta lei, designada de *Permitted Use*, pode ler-se que os sistemas de energia eólica de pequena dimensão devem ser considerados *permitted use* em todas as classificações de zonamento, onde qualquer estrutura é autorizada, sujeita a certos requisitos. Um desses requisitos prende-se com o ruído, sendo estabelecido que para velocidades de vento no intervalo de 0-25 mph ($\approx 11,2$ m/s) as turbinas eólicas de pequena dimensão não devem causar um nível sonoro superior a 60 dB(A) ou 5 dB(A) acima do ruído de fundo – o máximo entre os dois valores, medidos na habitação mais próxima. Este nível pode ser excedido em eventos de curta duração como cortes de energia elétrica e tempestades de vento severas.

5.6.2.2. Canadá

No Canadá, na província de Ontário, de acordo com o respetivo governo [72], é necessário aprovação, relativamente a projetos de energias renováveis (*Renewable Energy Approval* - REA), por parte do Ministério do Ambiente, para a maior parte dos projetos eólicos com exceção da classe de energia eólica de pequena escala 1. No portal do governo de Ontário [72], é disponibilizado um guia técnico para a obtenção desta aprovação - *Technical Guide to Renewable Energy Approvals* [73]. Segundo este guia, todos os projetos de energias renováveis que requeiram REA necessitam de um relatório de descrição de projeto (*Project Description Report* - PDR), que constitui o documento de síntese principal para a solicitação de REA. Este documento tem como objetivo analisar a proposta, incluindo uma breve descrição do projeto e de todos os efeitos ambientais negativos que possam resultar deste.

A figura Fig. 67, constante do guia mencionado, sumaria os requisitos necessários à obtenção da REA de projetos de energia eólica, para as classes 1 a 4, com as características de potência nominal e o nível de potência sonora apresentadas.

Wind			
Class	Name Plate Capacity (kW)	Greatest Sound Power Level (dBA)	Overview of REA Requirements ¹
Class 1	≤ 3	Any	No REA required
Class 2	> 3 and < 50	Any	REA required. Fewer study, reporting, setback, and consultation requirements
Class 3	≥ 50	< 102	REA required. Fewer setback requirements
Class 4	≥ 50	≥ 102	REA required

Fig. 67 - Classificação de projetos eólicos e respetivos requerimentos de aprovação no Canadá (Ontário) [73].

Este guia especifica ainda orientações relativamente ao ruído de projetos das classes 2 e 3.

No caso de projetos da classe 2, não existem requisitos de distâncias mínimas entre os recetores sensíveis e os aerogeradores, baseadas no ruído que estes emitem. Para a aprovação deste tipo de projetos são necessários o PDR e um Relatório de especificações de projetos eólicos de classe 2. É ainda recomendado que o promotor examine os efeitos ambientais negativos que ocorrerão devido ao ruído, no próprio PDR., incluindo um resumo das emissões de ruído dos aerogeradores propostos com referência ao relatório de especificações de projetos eólicos de classe 2; uma descrição da localização do aerogerador em relação à localização dos recetores na vizinhança do projeto; e conclusões acerca da probabilidade e magnitude dos efeitos ambientais negativos que provavelmente ocorrerão devido ao ruído proveniente do projeto e como estes podem ser tratados e mitigados.

Os projetos eólicos pertencentes à classe 3, também não necessitam de cumprir distâncias mínimas, contudo estas instalações cobrem uma vasta escala de projetos, que podem incluir projetos com várias turbinas. Por esta razão é recomendado que seja preparado um estudo de ruído relativo a parques eólicos constituídos por turbinas de grandes dimensões, como forma de avaliar os efeitos do ruído e determinar distâncias apropriadas relativamente aos recetores sensíveis.

Em relação ao ruído de aerogeradores, o ministério inspeciona estes projetos regularmente a fim de assegurar o cumprimento dos limites de ruído e avalia as queixas relativas a ruído dos mesmos.

5.6.2.3. Reino Unido

No Reino Unido, a lei GPDO, *The General Permitted Development Order* [74], concede direitos para instalar certas formas de tecnologias de energias renováveis, a nível doméstico, sem necessidade de solicitar uma licença de construção, *planning permission*.

Segundo o *Planning Portal* do governo britânico [75], a instalação, alteração ou substituição de uma turbina integrada num edifício ou montada isoladamente pode ser considerada de *permitted development*, ou seja, não necessita de licença de construção, desde que sejam satisfeitas algumas condições, como o cumprimento das normas de planeamento do esquema de certificação de microprodução - *Microgeneration Certification Scheme* [76]. Este esquema foi introduzido para pequenas e micro turbinas e exige a classificação do ruído provocado por estas de acordo com a *RenewableUK Small Wind Turbine Standard*, anterior *BWEA Small Wind Turbine Performance and Safety Standard*, que é, até hoje, a única norma diretamente relacionada com sistemas eólicos de pequena dimensão.

As normas de planeamento que devem ser respeitadas para que as instalações domésticas de turbinas eólicas sejam consideradas *permitted development* são as normas constantes no documento *MCS 020 - MCS Planning Standards For permitted development installations of wind turbines and air source heat pumps on domestic premise* [77]. Esta norma permite que as empresas de instalação estabeleçam claramente se a instalação está de acordo com as *MCS Planning Standard* e inclui um processo de cálculo para confirmar se o valor de ruído $L_{Aeq,5\text{ mins}}$ máximo de 42 dB é respeitado.

De acordo com esta norma, cada turbina terá o seu próprio rótulo de ruído, que pode ser obtido através do fabricante. Cada rótulo de ruído contém um mapa de ruído, que apresenta dois tipos de zonas, uma com o nível de ruído $L_{Aeq,5\text{ mins}}$, gerado pela turbina, a várias distâncias do centro do rotor desta, superior a 42 dB e outra com o mesmo nível de ruído inferior a 42 dB.

5.6.2.4. Países Baixos 2006

Nos Países Baixos as turbinas urbanas não são reconhecidas como uma tecnologia para produção de eletricidade, o que significa que estas não são reguladas pelos documentos e procedimentos relativos a energias renováveis, não existindo quadro jurídico para as turbinas urbanas. A regulamentação aplicável às turbinas urbanas consiste na regulamentação relativa a instalações de energia eólica e a energias renováveis em ambiente construído [78].

De acordo com esta regulamentação, em 2006, a instalação de uma turbina eólica necessita de licença de construção, com exceção de turbinas com um diâmetro rotor inferior a 2 m. É também necessária uma licença ambiental, com exceção para as turbinas que cumpram os seguintes critérios:

- Turbinas eólicas montadas em torre e diretamente conectadas ao solo, turbinas de eixo horizontal;
- Distância à habitação mais próxima ou a outro recetor sensível mínima de 4 vezes a altura da torre;
- Capacidade total instalada inferior a 15 MW;
- Turbinas que cumpram os requisitos relativos a segurança, produção de ruído, sombreamento, oscilação, vibração e operação descritos na lei *Besluit voorzieningen en installaties milieubeheer, Bvim* [79].

Em geral as turbinas de pequena dimensão necessitam de uma licença ambiental no caso de estarem localizadas numa instalação que necessite de uma licença ambiental, como por exemplo, uma fábrica. No caso de ambos os tipos de licença serem necessários, só é possível requerer a licença de construção depois de obter a licença ambiental.

De acordo com a *Lei da Habitação (Woningwet)*, os municípios devem definir requisitos que as instalações em edifícios (*building objects*) devem cumprir para obter uma licença de construção. O *Plano de Zoneamento (bestemmingsplan)* define alturas e larguras máximas de instalações em edifícios bem como as possíveis utilizações de uma certa área. Se a produção de energia eólica não é mencionada como possível utilização, este plano deve ser adaptado antes da permissão pelo município da instalação das turbinas.

As turbinas devem ainda cumprir normas relativas a segurança, como a IEC 61400-1 *Design requirements small wind turbines* e serem certificadas por entidades acreditadas para a certificação de turbinas eólicas de pequena dimensão. A produção de ruído deve estar de acordo com a norma IEC61400-11: *Wind turbine generator systems – Part 11: Acoustic noise measurement techniques* [80].

Quando as turbinas eólicas se situam ao longo de autoestradas, caminhos-de-ferro ou instalações industriais podem ser definidos requerimentos adicionais por parte do governo dos Países Baixos e dos caminhos-de-ferro holandeses.

No Quadro 6 apresentam-se os requisitos globais relativamente à distância entre as turbinas eólicas e outras instalações.

Quadro 6 – Distâncias recomendadas entre as turbinas eólicas e outras instalações nos Países Baixos [78].

Função	Distância mínima à turbina eólica (m)
Áreas habitacionais e espaços de lazer	300-500
Estradas	30 (estrada), 50 (canal)
Caminho-de-ferro	Raio + 7,85
Linha de alta tensão	50
Aeroporto / Rota de voo	1852 / 500
Autoestrada	30
Parque de estacionamento e posto de gasolina	30
Canal, rio, porto	50

5.6.2.5. França

Em França, quando se instala uma turbina eólica de pequena dimensão em ambiente urbano deve-se ter em conta vários requerimentos administrativos, que se resumiam de seguida, de forma a obter aprovação [81].

- A instalação de uma turbina com altura inferior a 12 m não necessita de licença de construção;
- Em todos os casos em necessária uma declaração de construção;
- É necessário um aviso de impacto relativo às instalações com menos 12 m de altura;
- Se a potência nominal instalada for menor que 2,5 MW, um estudo de impacto é necessário mas não é necessária consulta pública;
- A instalação de uma turbina eólica com altura superior a 50 m necessita de consulta pública.

O Quadro 7 sumaria a documentação necessária para a instalação de turbinas eólicas em função da altura da turbina eólica.

Quadro 7 - Documentação necessária em função da altura da turbina, em França [81] .

Altura	<12 m	[12 m; 50 m]	> 50 m
Documentação necessária	<ul style="list-style-type: none"> • Declaração de construção • Aviso de impacto 	<ul style="list-style-type: none"> • Licença de construção • Estudo de impacto 	<ul style="list-style-type: none"> • Licença de construção • Estudo de impacto • Consulta Pública

Não existe regulamentação específica relativamente ao ruído emitido por estas instalações de pequena dimensão e a regulamentação geral de ruído é aplicável.

O ruído urbano pode ser definido pelo seu impacto acima e abaixo do “ruído de fundo” típico de uma localização específica, ou seja, pelo acréscimo de ruído causado por uma fonte sonora específica, neste caso uma turbina eólica. Em França a regulamentação estabelece que o acréscimo máximo permitido é de +5 dB(A) durante o dia (entre 7h e as 10h) e + 3 dB(A) durante a noite (entre as 22h e as 7h) [81].

6

CASOS DE ESTUDO

6.1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo apresentam-se casos de estudo teóricos e práticos, bem como os resultados das medições de ruído efetuadas relativamente aos casos de estudo práticos. Descrevem-se ainda alguns dos casos de estudo práticos relativamente aos quais não foi possível realizar as medições e o motivo pelo qual não foi possível estudá-los. A forma e a razão da escolha destes casos de estudo são também apresentadas.

Em primeiro lugar salienta-se o facto de existirem casos de estudos teóricos de forma a complementar o presente trabalho devido à impossibilidade de estudar parte dos casos de estudo práticos descritos neste trabalho, ampliando desta forma a coletânea de dados e resultados relativos a medições efetuadas em aerogeradores de pequena dimensão. Não foi encontrado nenhum estudo português similar realizado em Portugal, pelo que foram considerados casos de estudo realizados noutros países que são apresentados nos subcapítulos seguintes e, posteriormente, utilizados como elementos de análise para simulação do contexto nacional.

Os casos de estudo práticos situam-se nos concelhos da Maia, Porto, Chaves, Aveiro e Vila do Conde. Estes consistem em aerogeradores de pequena dimensão e foram selecionados tendo em conta a proximidade geográfica e a disponibilidade de informação relativamente a esses casos.

No início deste trabalho procurou-se investigar os aerogeradores existentes em Portugal através de pesquisas *online*, nomeadamente no portal “Renováveis na Hora” [51], que indica o concelho de cada um dos aerogeradores registados neste portal e sobre empresas do setor da energia eólica. Estabeleceram-se contactos telefónicos e presenciais que levaram à localização de alguns aerogeradores.

Relativamente aos aerogeradores registados no portal “Renováveis na Hora”, não foi possível obter informação acerca da sua localização exata, sendo por isso, inicialmente, postos de parte. Para obter esta informação foi contactada a DGEG, em particular a Direção de Serviços de Energia Elétrica da DGEG, direção responsável pela inspeção das unidades de micro e mini produção, que não forneceu a localização exata destas unidades. Posteriormente, num novo contacto, alguma dessa informação foi facultada resultando no acrescento de alguns casos de estudo adicionais.

Além da DGEG, foram contactadas algumas das unidades instaladoras, também registadas no portal “Renováveis na Hora” e empresas instaladoras de aerogeradores de pequenas dimensão. As entidades instaladoras estão divididas por concelhos, apesar de não serem necessariamente

responsáveis pela instalação de unidades no concelho a que pertencem, o que dificultou a obtenção de informação acerca de aerogeradores localizados nos concelhos pretendidos.

Uma destas entidades foi responsável pela instalação do aerogerador do ISMAI (Maia), que forneceu informações sobre a sua ligação e funcionamento e que se disponibilizou a facilitar a realização das medições. Foram efetuadas várias visitas ao local e realizadas algumas medições embora aerogerador não estivesse suficientemente ativo e durante o tempo necessário para efetuar as medições de forma a se poderem obter resultados viáveis. No início de 2014 este aerogerador sofreu danos devido ao mau tempo, o que impossibilitou a realização das medições depois desta altura.

Foram ponderados ainda outros dois aerogeradores situados no concelho da Maia. Para obter informações sobre estas instalações foi contactada a Câmara Municipal da Maia e a empresa instaladora, que se comprometeu a enviar as especificações técnicas das turbinas eólicas. Contudo tal não aconteceu e durante as visitas aos locais os aerogeradores não se encontravam a funcionar durante o tempo necessário para efetuar as medições de forma correta.

Ainda no concelho da Maia, foi estudada a possibilidade de estudar um aerogerador registado no portal “Renováveis na Hora” cuja localização foi fornecida apenas no final de Maio de 2014. Contudo este aerogerador não se encontrava minimamente ativo impossibilitando a realização das medições de ruído.

No concelho de Aveiro, o aerogerador existente na Universidade de Aveiro, sofreu também danos relevantes tendo sido desligado para impedir a sua entrada em funcionamento.

No concelho de Chaves, foram ainda contactadas duas empresas, que disponibilizaram informações acerca de um aerogerador de eixo vertical, relativamente ao qual não foi possível efetuar as medições ou porque não estava a funcionar ou porque as condições meteorológicas não permitiram ou porque não houve disponibilidade imediata por parte do Laboratório de Acústica da FEUP para efetuar as medições em Maio de 2014.

No Porto, precisamente no edifício da biblioteca da FEUP, existe um aerogerador que nunca se encontrou suficientemente ativo para que se pudessem realizar medições relativamente ao ruído emitido.

Os casos de estudo práticos aqui apresentados correspondem a um aerogerador situado no concelho de Chaves, na freguesia de Oura e outro aerogerador localizado em Mindelo, no concelho de Vila do Conde.

6.2. CASOS DE ESTUDO TEÓRICOS

Neste subcapítulo descrevem-se casos de estudo teóricos internacionais, onde são apresentadas as medições de ruído efetuadas e a caracterização do nível sonoro relativo a aerogeradores de pequena dimensão, bem como a extrapolação da análise para a situação nacional, em termos de enquadramento legal relativo ao cumprimento do atual RGR.

Algumas das medições de ruído descritas nos subcapítulos foram efetuadas de acordo com a norma internacional IEC 61400-11: *Wind turbine generator systems – Part 11: Acoustic noise measurement techniques* [80], que é descrita resumidamente no ponto seguinte.

6.2.1. PROCEDIMENTOS DE MEDIÇÃO SEGUNDO A NORMA IEC 61400-11

Segundo a norma *IEC 61400-11 - Wind turbine generator systems – Part 11: Acoustic noise measurement techniques* [80], as medições acústicas devem permitir obter informação acerca das emissões de ruído do aerogerador para velocidades de vento de 6, 7, 8, 9 e 10 m/s, a uma altura de 10 m e com uma rugosidade aerodinâmica de 0,05 m, como o nível de potência sonora aparente, o espectro sonoro de 1/3 de oitava e as características de tonalidade.

O equipamento usado na determinação do nível sonoro contínuo equivalente deve cumprir os requisitos de um sonómetro do tipo 1. Adicionalmente este equipamento deve possuir uma resposta em frequência constante, pelo menos, no intervalo de frequências de 45 a 11.200 Hz e os filtros usados também devem cumprir os requisitos da Classe 1. O equipamento de medição deve ser calibrado imediatamente antes e depois das medições numa ou mais frequências usando um calibrador acústico.

O microfone deve ser montado no centro de uma placa rígida e plana com o diafragma do microfone num plano normal ao da placa e com o seu eixo na direção do aerogerador. A placa deve ser circular e com um diâmetro de, pelo menos, 1,0 m.

Para a realização das medições existe uma posição de referência, na direção do vento, e mais três posições opcionais, como se pode observar na Fig. 68. A distância de referência, R_0 , para aerogeradores de eixo horizontal é igual à soma da distância vertical do solo ao centro do rotor com metade do diâmetro do rotor. No caso de aerogeradores de eixo vertical a distância de referência, R_0 , é soma da distância vertical desde o solo ao centro do rotor com o diâmetro do rotor do aerogerador.

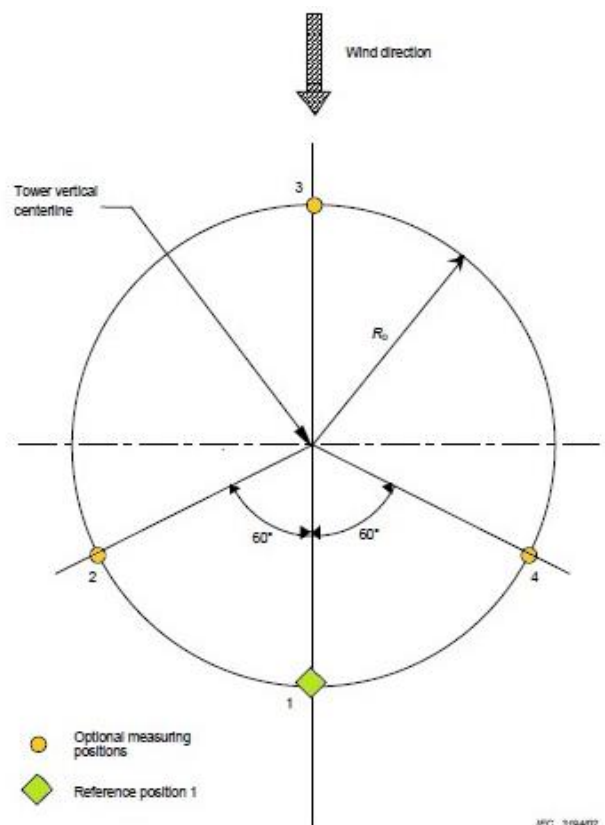


Fig. 68 - Vista em planta das posições do microfone [80].

O anemómetro deve ser montado a montante do aerogerador, em relação à direção do vento, a uma altura compreendida entre 10 m e a altura do centro do rotor e o transdutor de vento deve ser colocado a uma distância entre duas a três vezes o diâmetro da turbina do centro do rotor. Durante a realização das medições os períodos de medição relativos a acontecimentos acústicos discretos devem ser omitidos.

O ruído residual deve ser medido usando o mesmo equipamento e com a turbina eólica desligada imediatamente antes e depois de cada série de medições de ruído ambiente com a turbina em funcionamento e com condições de vento semelhantes. As medições de ruído residual devem ser representativas do ruído residual que ocorre durante as medições de ruído ambiente com a turbina em funcionamento.

Os níveis de pressão sonora contínuos equivalentes, ponderados em A, devem ser medidos na posição de referência através de uma série de pelo menos 30 medições simultâneas com as medições da velocidade de vento. Cada medição deve ser integrada por um período não inferior a 1 minuto.

6.2.2. CASO DE ESTUDO 1 - AEROGERADOR *GAIA-WIND* 11-KW (COLORADO – EUA)

Neste subcapítulo, apresenta-se o caso de estudo de um aerogerador *Gaia Wind 11 kW* [82], cujas características se encontram descritas no Quadro 8.

Quadro 8 - Características do aerogerador *Gaia Wind* [82].

Modelo	<i>Gaia Wind 11 kW</i>
Fabricante	<i>Gaia Wind</i>
Potência nominal	11 kW
Número de pás	2
Eixo	Horizontal
Rotor	<i>Downwind</i>
Altura do centro do rotor	18,2 m
Distância horizontal desde o centro do rotor ao eixo da torre	2,1 m
Diâmetro do rotor	13 m
Mecanismo de controlo	<i>Stall</i> Passivo
Velocidade variável ou constante	Constante
Velocidade de rotação a uma velocidade de vento de 6 a 10 m/s	60-61 rpm

O aerogerador *Gaia* encontra-se no *National Wind Technology Center*, no Colorado (EUA) e, como se pode observar na Fig. 69, encontra-se próximo de outros aerogeradores. A topografia do terreno onde estão implantados é plana e existem alguns arbustos de pequena dimensão. Os aerogeradores representados, nomeadamente, o NW100b, o ARE442 e o *Skystream* encontravam-se desligados durante a realização das medições de ruído do aerogerador *Gaia*. Relativamente ao aerogerador *Mariah* não é disponibilizada informação.

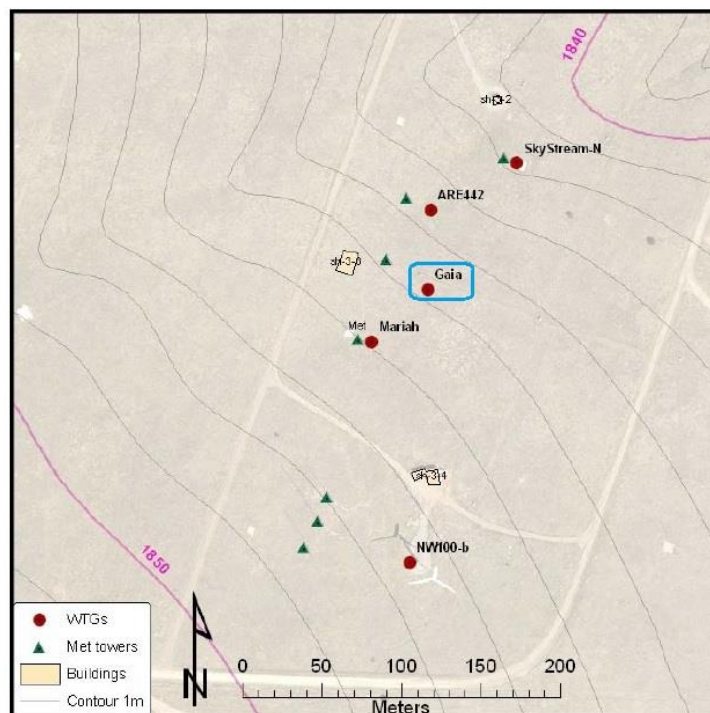


Fig. 69 – Localização do aerogerador *Gaia Wind*, Colorado (EUA) [82].

O equipamento usado durante as medições foi o seguinte:

- Microfone da Brüel & Kjaer, modelo 4189-A-021;
- Calibrador da Brüel & Kjaer, modelo nº. 4231;
- Anemómetro da Thies, modelo 1ª classe;
- *Wind Vane* (“Cata-ventos”) da Met One, modelo 020C;
- Sensor de pressão da Vaisala, modelo PTB101B;
- Sensor de temperatura da Met One, T-200 RTD.

O microfone encontrava-se a uma distância horizontal da turbina de 24,7 m, que equivale à soma da altura do centro do rotor com metade do diâmetro do rotor e a uma distância do centro do rotor de 30,7 m.

O anemómetro e a *wind vane* foram colocados numa torre meteorológica localizada a 32,7 m do aerogerador *Gaia*. O anemómetro foi colocado à altura do centro do rotor de 18,3 m e a torre meteorológica distava 2,5 diâmetros do rotor da localização do aerogerador. A velocidade de vento a 10 m de altura foi determinada a partir da velocidade de vento medida no anemómetro à altura do centro do rotor (18,2 m) assumindo um perfil de vento idealizado baseado numa rugosidade aerodinâmica do terreno de 0,05 m.

Cada medição foi integrada durante o período de 10 segundos em vez de um minuto, para melhor caracterizar a natureza do aerogerador de pequena dimensão

Foram recolhidos dados meteorológicos durante os dias 28 de Fevereiro de 2008 e 11 de Março de 2010, de velocidades de vento usadas, temperatura e pressão:

- 24 Fevereiro 2009: 1,4 a 16,3 m/s; 14,6 a 16,3 °C e 80,4 a 80,7 kPa;
- 11 Março 2010: 3,1 a 12,2 m/s; 3,9 a 6,2 °C; 80,3 a 80,4 kPa.

Na Fig. 70 apresentam-se os níveis sonoros de ruído ambiente (com o aerogerador em funcionamento) e de ruído residual (aerogerador desligado) e na figura Fig. 71 os espectros sonoros em bandas de 1/3 de oitava, para velocidades de vento de 6, 7, 8, 9, 10 e 11 m/s.

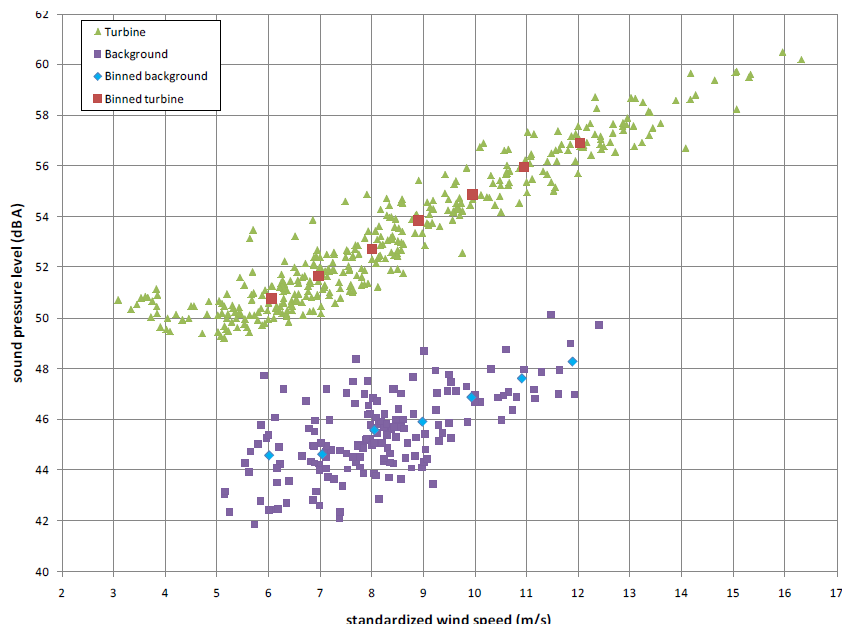


Fig. 70 – Níveis sonoros de ruído ambiente e de ruído residual do aerogerador *Gaia Wind* [82]

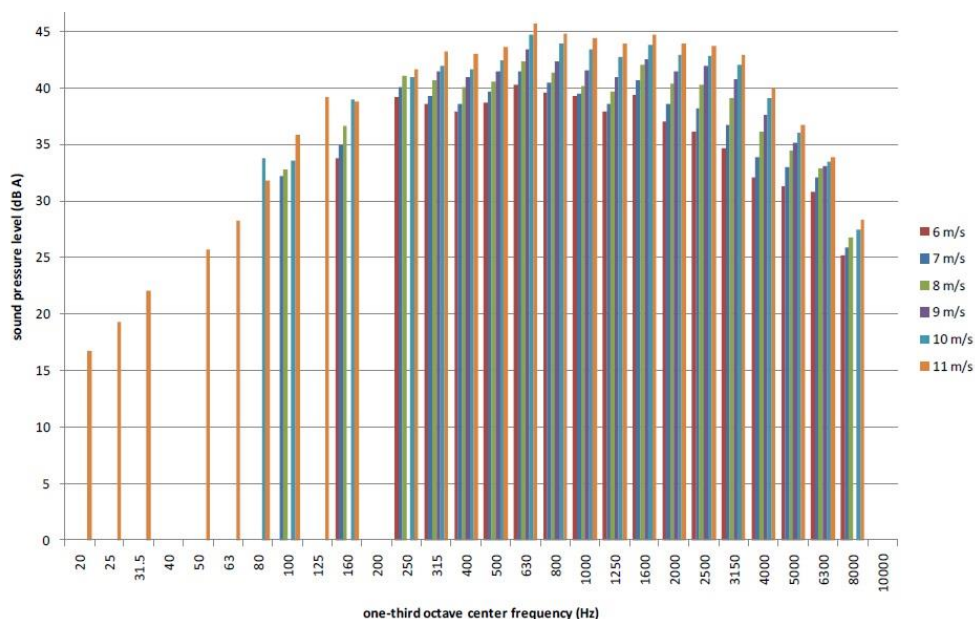


Fig. 71 – Espectro por banda de 1/3 de oitava para diferentes velocidades de vento do aerogerador *Gaia Wind* [82].

Neste estudo a tonalidade foi calculada de acordo com os métodos descritos na norma IEC 61400-11 [80] e sua análise concluiu que o ruído apresenta componentes tonais para as velocidades de vento de 6, 7, 8 e 9 m/s. Esta análise não foi efetuada para velocidades de vento de 10 m/s porque, segundo o estudo consultado, os dados disponíveis não eram adequados.

Com vista a perceber se os limites dispostos no RGR seriam cumpridos, caso este aerogerador fosse instalado em Portugal, avalia-se de seguida o seu comportamento em relação ao critério de exposição e ao critério de incomodidade.

- **Critério de exposição:** Na aplicação deste critério calculou-se o valor do indicador L_{den} através da expressão 8, considerando que os indicadores L_e e L_n tomariam o mesmo valor do indicador L_d , obtido nas medições efetuadas, uma vez que segundo este estudo as únicas fontes sonoras que influenciariam as medições, seriam aerogeradores próximos do local de estudo que estariam a funcionar durante as medições, desta forma os níveis medidos nos diferentes períodos de referência seriam similares. Considerou-se ainda a situação mais gravosa em que os valores de ruído sonoro apresentados na Fig. 70 ocorreriam durante o período noturno e analisou-se o cumprimento do critério de exposição para o indicador L_n , para Zonas mistas e Zonas Sensíveis.
- **Critério de incomodidade:** Na aplicação deste critério foram arbitradas algumas variáveis cujos valores não estavam disponíveis.

De forma a ter em conta a situação mais gravosa, o parâmetro D foi considerado igual a 0 dB(A) o que corresponde a uma relação percentual entre a duração acumulada de ocorrência do ruído particular e a duração total do período de referência superior a 75%, ou seja, a turbina eólica funcionaria em pelo menos 75% do tempo total do período de referência. A constante $K_{impulsivo}$ tomou o valor de 0 dB(A), uma vez que não existem dados sobre a impulsividade do ruído e a probabilidade deste ruído ser impulsivo é baixa; A constante K_{tonal} tomou o valor de 3 dB(A) para as velocidades de vento de 6, 7, 8 e 9 m/s uma vez que neste estudo se concluiu que o ruído apresentava componentes tonais.

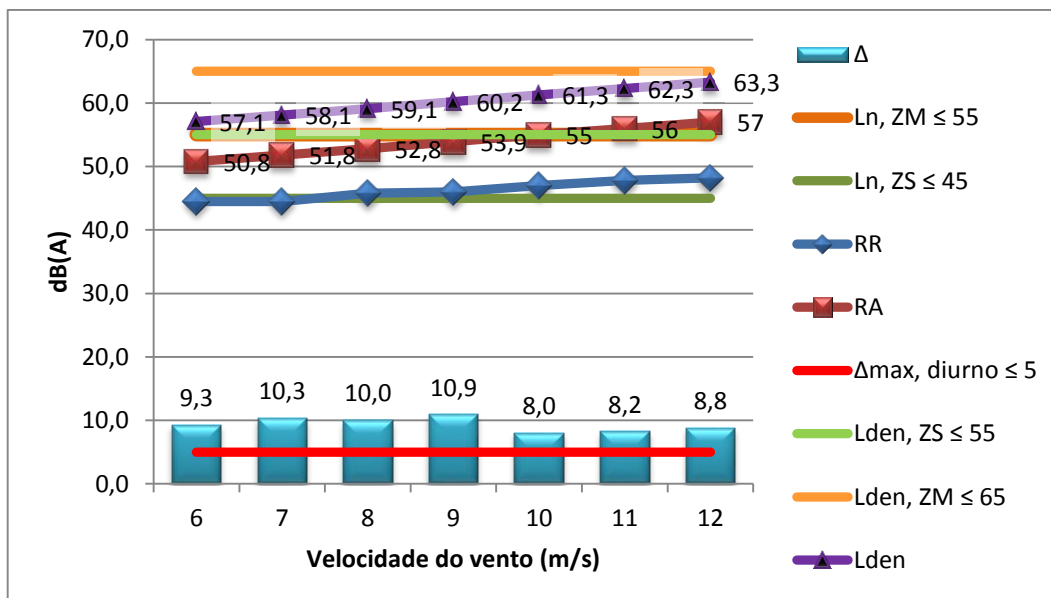


Fig. 72 - Níveis sonoros envolvidos na avaliação dos critérios de incomodidade e exposição do aerogerador *Gaia-Wind*.

Na Fig. 72 pode observar-se a representação dos valores de ruído ambiente (RA) e de ruído residual (RR), do valor do indicador L_{den} , dos limites legais dos indicadores L_n e L_{den} para zonas sensíveis (ZS) e para zonas mistas (ZM) e a diferença Δ entre o ruído ambiente e o ruído residual, assim como do respetivo valor legal máximo para o período diurno (Δ_{max}), para uma velocidade de vento média a partir de 6 m/s.

Analisando o valor do indicador L_{den} verifica-se que para todas as velocidades de vento indicadas o critério de exposição é cumprido para Zona Mistas e não é cumprido para Zonas Sensíveis. Os níveis sonoros de ruído ambiente não cumprem o limite máximo de exposição de zonas sensíveis para todas as velocidades de vento analisadas. No caso de zonas mistas, este limite é excedido para velocidades superiores a 10 m/s, sendo cumprido para velocidades de vento entre 6 e 10 m/s, segundo os dados deste estudo. Sem o ruído da turbina, o critério de exposição correspondente a zonas sensíveis seria cumprido para velocidades de vento inferiores a 7 m/s.

Por sua vez o critério de incomodidade não é cumprido para nenhuma das velocidades de vento analisadas, nem para qualquer dos períodos do dia.

6.2.3. CASO DE ESTUDO 2 - AEROGERADOR *BORNAY INCLIN* 1500 (NARBONA, FRANÇA)

Neste caso de estudo apresenta-se um aerogerador *Bornay Inclín*, que se encontra instalado em Montplaisir, em Narbona (França) e cujo estudo de ruído foi realizado no âmbito de uma avaliação do impacto acústico no meio ambiente deste aerogerador [83]. As especificações técnicas do aerogerador são as indicadas no Quadro 9.

Quadro 9 – Características do aerogerador *Bornay Inclín* 1500 [83].

Modelo	<i>Bornay Inclín</i> 1500
Fabricante	<i>Bornay</i>
Eixo	Horizontal
Diâmetro do rotor	2,86 m
Potência nominal	1500 W a 12 m/s
Número de pás	2

De seguida apresenta-se a descrição do local e das medições acústicas efetuadas. Na Fig. 73 podem observar-se as posições de medição e a localização do aerogerador.

No local existem quatro aerogeradores para cada um dos quais foram considerados quatro pontos de medição (1, 3, 5, 7), localizados a distâncias da torre de 5, 10, 20, e 35 m respetivamente, como se pode observar na Fig. 73.

Em cada um destes pontos foi medido o nível sonoro do ruído ambiente e do ruído residual, em 5 medições de 10 segundos, durante um período de 5 minutos, assim como o espectro em bandas de 1/3 de oitava e calculada a diferença entre os valores, por banda de frequência, designada neste estudo por ruído de emergência. As velocidades de vento foram medidas através de um anemómetro, colocado numa torre meteorológica localizada no local. O equipamento de medição de ruído consistiu num “analisador de ruído em tempo real” CESVA.

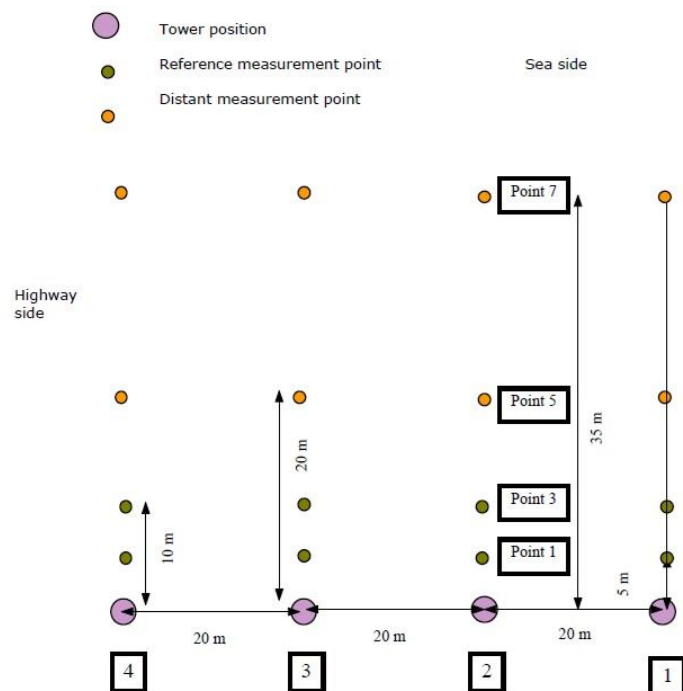


Fig. 73 – Posição dos aerogeradores 1, 2, 3 e 4 e posições de medição 1, 3, 5 e 7 para o aerogerador *Bornay Inclín* [83].

Foram efetuadas três séries de medições em três dias diferentes, 1 de Fevereiro de 2005, 4 de Março de 2005, 31 de Maio de 2005. Os dados apresentados no estudo referem-se aos dois primeiros dias e para o aerogerador n.º 2, tendo-se recolhido para esta análise os que se referiam ao dia 4 de Março, uma vez que eram os que permitiam ter a totalidade da informação relevante, nomeadamente, a relação entre a velocidade do vento e o nível sonoro.

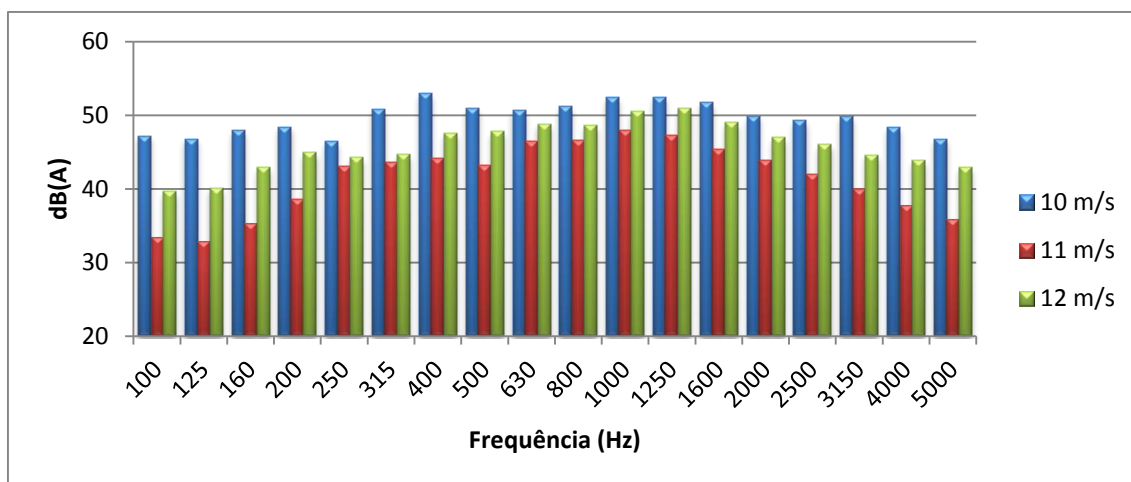


Fig. 74 – Espectros por banda de 1/3 de oitava para o aerogerador *Bornay Inclín* 1500.

Na Fig. 74 podem observar-se os espectros sonoros por banda de 1/3 de oitava, correspondentes às medições realizadas nos Pontos 1, 7 e 3, para as velocidades de vento de 10, 11 e 12 m/s, respetivamente.

Na Fig. 75, apresentam-se os resultados das medições efetuadas no aerogerador n.º 2 e para as posições 1, 3 e 7, durante as quais os aerogeradores 1, 3 e 4 se encontravam desligados. O nível sonoro ambiente (RA) corresponde ao ruído com o aerogerador 2 em funcionamento e o nível sonoro residual (RR) ao ruído com o aerogerador 2 desligado. As medições realizaram-se com velocidades de vento entre aproximadamente 10 e 12 m/s.

De forma a perceber se os limites dispostos no RGR seriam cumpridos, caso este aerogerador se instalasse em Portugal, verifica-se de seguida o respeito pelo critério de exposição e pelo critério de incomodidade.

- **Critério de exposição:** Devido ao não conhecimento do período de referência durante o qual se realizaram as medições e à falta de dados de níveis sonoros relativos aos três períodos de referência, bem como à falta de informação sobre as condições em que se realizaram as medições, como por exemplo, cuidados em evitar outros ruídos que não os da turbina, aplicou-se este critério considerando a situação mais gravosa em que os valores de ruído sonoro apresentados ocorreriam durante o período noturno e analisou-se o cumprimento do critério de exposição para Zonas mistas e Zonas Sensíveis.
- **Critério de incomodidade:** Na aplicação deste critério foram arbitradas algumas variáveis cujos valores não eram conhecidos.

De forma a ter em conta a situação mais gravosa, o parâmetro D foi considerado igual a 0 dB(A), ou seja, que a turbina funcionava em pelo menos 75% do tempo total do período de referência.

A constante $K_{\text{impulsivo}}$ tomou o valor de 0 dB(A), uma vez que não existem dados sobre a impulsividade do ruído e a probabilidade deste ruído ser impulsivo é baixa bem como a constante K_{tonal} uma vez que através da análise dos espectros sonoros de ruído ambiente correspondentes às três posições estudadas se concluiu que não existiam componentes tonais, na gama de frequências de 100 a 5000 Hz.

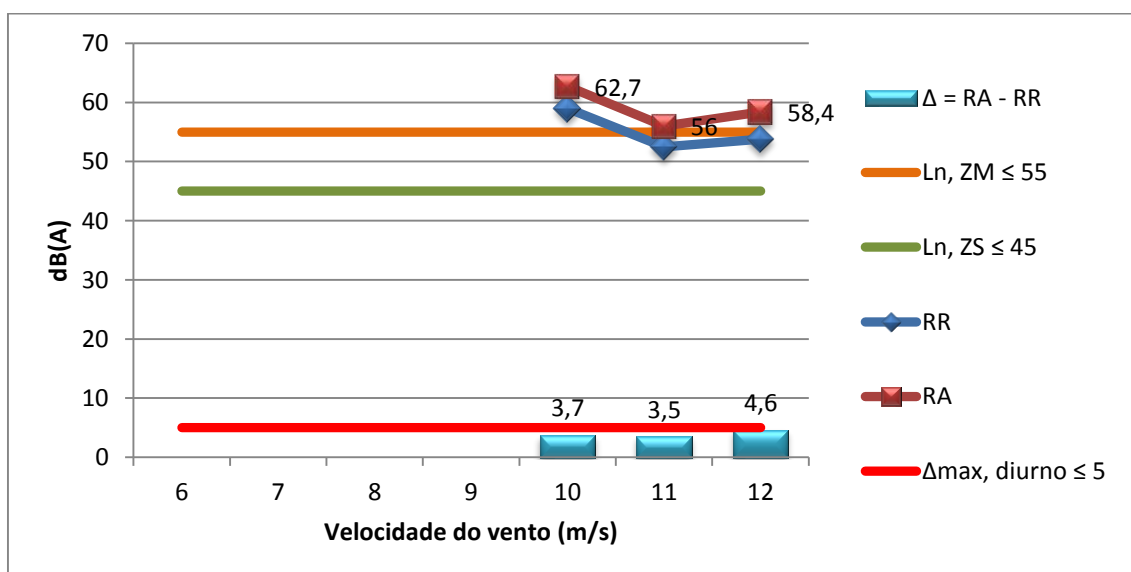


Fig. 75 - Níveis sonoros envolvidos na avaliação dos critérios de incomodidade e exposição para o aerogerador *Bornay Inclín 1500*.

Na Fig. 75 podem observar-se a representação dos valores de ruído ambiente (RA) e de ruído residual (RR), dos limites legais do indicador L_n para Zonas Sensíveis (ZS) e para Zonas Mistas (ZM) e a diferença Δ entre o ruído ambiente e o ruído residual, assim como do respetivo valor legal máximo para o período diurno (Δ_{\max}).

Verifica-se que o valor do limite máximo do indicador L_n é excedido para todas as velocidades de vento para zonas sensíveis e para zonas mistas.

O critério de incomodidade é cumprido para todas as velocidades de vento indicadas no período de referência diurno e para a velocidade de 10 m/s e de 11 m/s no período do entardecer. No período noturno o critério de incomodidade não é cumprido para nenhuma das velocidades de vento indicadas.

6.2.4. CASO DE ESTUDO 3 - AEROGERADOR *WHISPER 40* (GOLDEN, EUA)

Neste subcapítulo apresenta-se um estudo de ruído realizado pelo *National Renewable Energy Laboratory* [84], num aerogerador de 900 W, *Whisper 40*, cujas características se apresentam de seguida no Quadro 10.

Quadro 10 - Especificações técnicas *Whisper 40* (Golden, EUA) [84].

Modelo	<i>Whisper 40</i>
Eixo	Horizontal
Orientação	<i>Upwind</i>
Altura do centro do rotor	9,1m
Diâmetro do rotor	2,1 m
Área de captação de energia incidente do vento	3,6 m ²
Potência nominal	900 W a 12,5 m/s
Número de pás	3
Velocidade de arranque	3,4 m/s
Velocidade nominal	12,5 m/s
Mecanismo de proteção	<i>Furling</i>
Mecanismo de orientação	“cata-ventos”

O equipamento usado durante as medições foi o seguinte:

- Microfone da ACO Japan, modelo 7012;
- Calibrador da Bruel & Kjaer, modelo 4230;
- Anemómetro da Met One, modelo 010C;
- *Wind Vane* (“Cata-ventos”) da Met One, modelo 020C;
- Sensor de pressão da Omega, modelo HHP-102F;
- Sensor de temperatura da Omega, 869.

O anemómetro encontrava-se a 9,1 m de altura, numa torre meteorológica localizada a 6,7 m a montante do aerogerador, relativamente à direção do vento.

Cada medição foi integrada durante o período de 10 segundos em vez de um minuto, para melhor caracterizar a natureza do ruído relativo à resposta do aerogerador a mudanças de velocidade de vento.

As medições de ruído foram efetuadas nos dias 4 e 25 de Janeiro de 2001 entre as 09:25 e as 15:40 h e entre as 16:30 e as 18:00 h, respetivamente e no dia 5 de fevereiro de 2001 entre o 12:00 e as 14:30 h.

Na Fig. 76 apresenta-se o nível sonoro emitido pelo aerogerador e o nível sonoro de ruído residual, sem o funcionamento do aerogerador, a uma distância de 10,2 m do centro da base da torre do aerogerador.

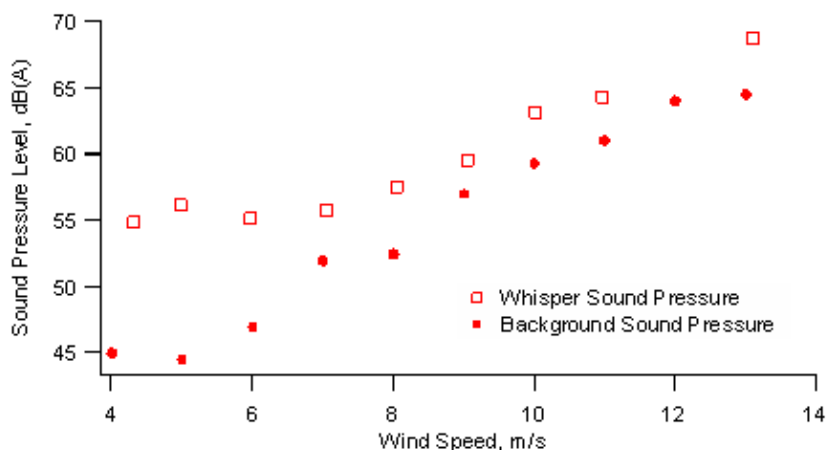


Fig. 76 – Níveis sonoros correspondentes às velocidades de vento de 4, 6, 8, 10, 12 e 14 m/s para o aerogerador *Whisper 40* [85].

Com vista a perceber se os limites dispostos no RGR seriam cumpridos, caso este aerogerador se instalasse em Portugal, são verifica-se o comportamento em relação ao critério de exposição e o critério de incomodidade para o presente caso.

- **Critério de exposição:** Os valores de ruído obtidos neste estudo resultaram de medições efetuadas apenas durante o período diurno. Uma vez que o ruído proveniente de fontes sonoras passageiras foi omitido dos resultados, os níveis sonoros para ambos os períodos de referência seriam semelhantes. Desta forma calculou-se o valor do indicador L_{den} através da expressão 8, considerando que os indicadores L_e e L_n tomariam o mesmo valor do indicador L_d obtido nas medições efetuadas. Considerou-se ainda a situação mais gravosa em que os valores de ruído sonoro apresentados na Fig. 76 ocorreriam durante o período noturno e analisou-se o cumprimento do critério de exposição relativo ao indicador L_n para Zonas mistas e Zonas Sensíveis.
- **Critério de incomodidade:** Na aplicação deste critério foram arbitradas algumas variáveis cujos valores não estavam disponíveis no estudo consultado.

De forma a ter em conta a situação mais gravosa, o parâmetro D foi considerado igual a 0 dB(A), ou seja, que a turbina funcionava em pelo menos 75% do tempo total do período de referência.

A constante $K_{\text{impulsivo}}$ tomou o valor de 0 dB(A), uma vez que não existem dados sobre a impulsividade do ruído e a probabilidade deste ruído ser impulsivo é baixa. A constante K_{tonal} tomou o valor 0 dB(A) uma vez que, segundo o estudo consultado, não se identificaram componentes tonais durante as medições.

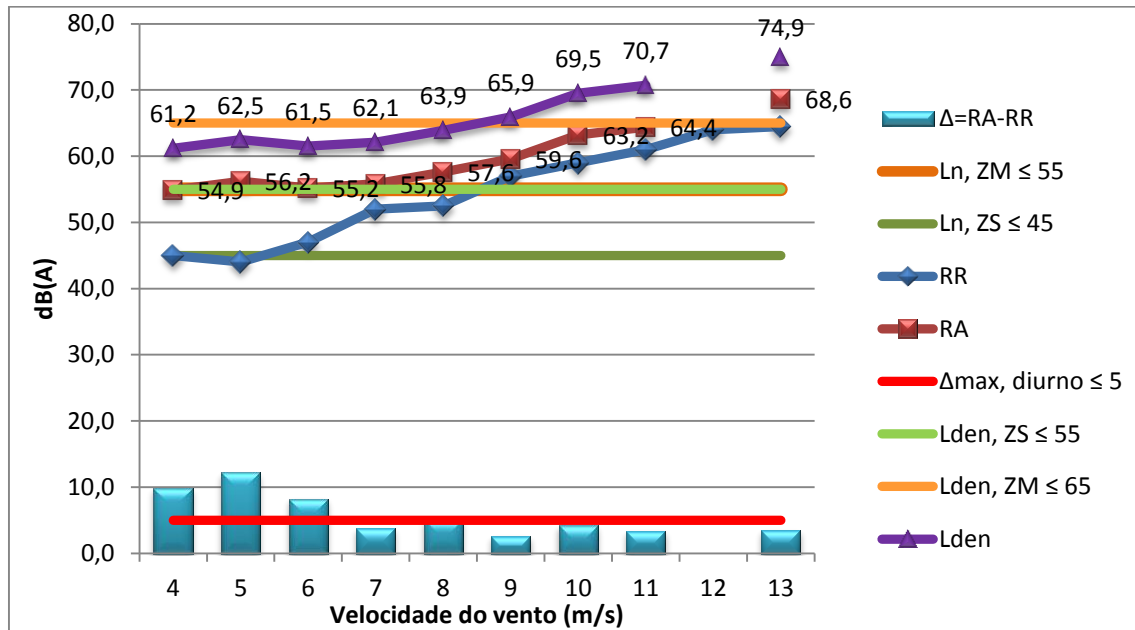


Fig. 77 - Representação gráfica dos níveis sonoros envolvidos na avaliação dos critérios de incomodidade e exposição para o aerogerador *Whisper 40*

Na Fig. 77 pode observar-se a representação dos valores de ruído ambiente (RA) e de ruído residual (RR), do valor do indicador L_{den} , dos limites legais dos indicadores L_n e L_{den} para zonas sensíveis (ZS) e para zonas mistas (ZM) e a diferença Δ entre o ruído ambiente e o ruído residual, assim como do respetivo valor legal máximo para o período diurno (Δ_{max}).

Analisando o valor do indicador L_{den} , verifica-se que o critério de exposição não é cumprido para Zonas Sensíveis e no caso de Zonas Mistas para velocidades superiores e iguais a 9 m/s. Considerando que o valor do RA corresponderia ao indicador L_n verifica-se que, segundo o estudo consultado e para Zonas Sensíveis, o critério de exposição praticamente não é cumprido para nenhuma das velocidades de vento, sendo cumprido apenas em Zonas Mistas e para velocidades de vento de, aproximadamente 4 m/s.

O critério de incomodidade é cumprido em qualquer período de referência para a velocidade de vento de 9 m/s e não é cumprido em todos os períodos de referência para velocidades inferiores a 6 m/s e de 8 m/s. Para as restantes velocidades o critério de exposição é cumprido para o período diurno e do entardecer para velocidades de 11 m/s e 13 m/s e apenas para o período diurno para as velocidades de 7 m/s e 10 m/s.

Na eventualidade de ocorrer tonalidade e a constante K_{tonal} tomar o valor de 3 dB(A), o critério de incomodidade não seria cumprido.

6.2.5. CASO DE ESTUDO 4 – AEROGERADOR QR5 (PEMBROKESHIRE, UK)

O estudo aqui descrito sumaria os resultados do relatório de medição de ruído conduzido no aerogerador QR5 v1.2 VAWT, no dia 20 de Dezembro de 2007, cuja fotografia se apresenta na Fig. 78 e cujas características estão descritas no Quadro 11 [86].

O local onde se efetuaram as medições denota níveis sonoros baixos e situa-se longe de fontes sonoras como estradas, árvores, habitações e indústria, num terreno relvado, sem superfícies refletoras próximas. As medições cumpriram o indicado na norma BS EN 61400-11: 2003 – *Wind turbine generator systems. Acoustic measurement techniques* [80]. Foram efetuadas usando quatro microfones, em que o microfone de referência foi posicionado a montante do aerogerador, relativamente à direção do vento, e a uma distância de 22,5 m da base da torre. Os três microfones adicionais foram posicionados como descrito na referida norma, para que se pudesse analisar a diretividade e a tonalidade. Foi usado equipamento da *Brüel & Kjær*.



Fig. 78 – Aerogerador qr5 v1.2 VAWT em Pembrokeshire, UK [87].

Quadro 11 – Especificações técnicas do aerogerador QR5 v1.2 VAWT em Pembrokeshire [87].

Modelo	QR5 v1.2
Fabricante	<i>Quiet Revolution</i>
Eixo	Vertical
Diâmetro do rotor / área de captação de energia incidente do vento	3,1 m / 16 m ²
Velocidade de arranque	5 m/s
Velocidade de paragem	26 m/s
Altura	5,5 m
Altura da torre	15 m
Potência nominal	A 11 m/s: 4,6 kW (gerador aerodinâmico), 3,3 kW (gerador de corrente continua) e 2,3 kW (gerador de ligação à rede elétrica)

Os níveis de pressão sonora ponderados em A, foram medidos durante intervalos de um minuto, com o aerogerador em funcionamento (ruído ambiente) e com o aerogerador desligado (ruído

residual) e, para uma distância a 22,5 m do rotor com uma velocidade de vento de 10 m/s, o nível de pressão sonora equivalente medido foi de 57,9 dB(A), na Fig. 79 podem observar-se os níveis sonoros de ruído ambiente e de ruído residual para diferentes velocidades de vento.

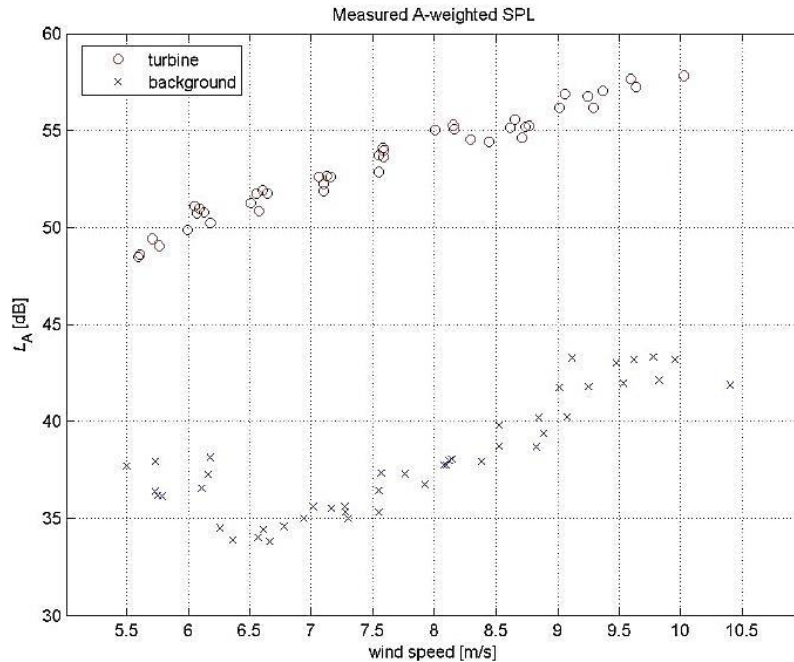


Fig. 79 – Níveis sonoros correspondentes a diferentes velocidades de vento do aerogerador QR5 v1.2 VAWT [87].

De acordo com este estudo foi aplicado o critério de tonalidade apresentado na norma BS 4142 tendo-se verificado não existirem componentes tonais. É ainda apresentado um mapa de emissão de ruído, com informação sobre os níveis sonoros equivalentes a várias distâncias do aerogerador e para velocidades de vento compreendidas entre 4 e 16 m/s, como se pode observar na Fig. 80.

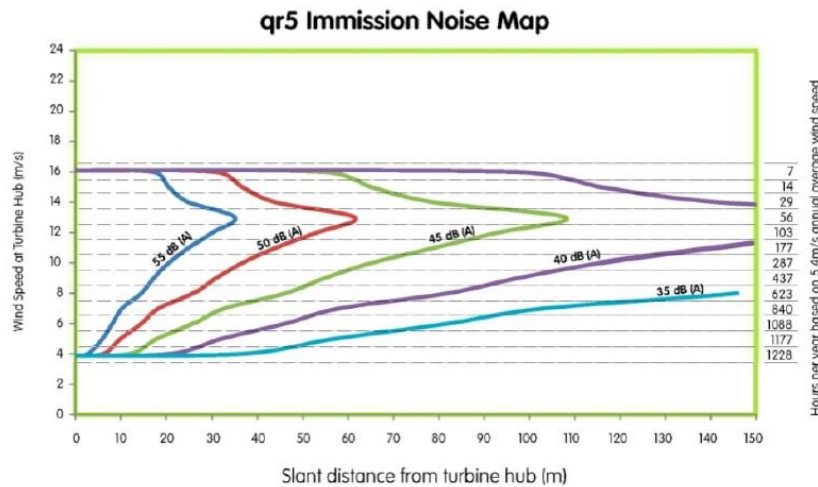


Fig. 80 – Mapa de emissão de ruído do aerogerador QR5 v1.2 VAWT [87].

De forma a perceber se os limites dispostos no RGR seriam cumpridos, caso este aerogerador se instalasse em Portugal, avaliou-se a sua compatibilidade com o critério de exposição e o critério de incomodidade:

- **Critério de exposição:** Devido ao não conhecimento do período de referência durante o qual se realizaram as medições e à falta de dados de níveis sonoros relativos aos três períodos de referência, bem como à falta de informação sobre as condições em que se realizaram as medições, como por exemplo, cuidados em evitar outros ruídos que não os da turbina, aplicou-se este critério considerando a situação mais gravosa em que os valores de ruído sonoro apresentados na Fig. 79 ocorreriam durante o período noturno e analisou-se o cumprimento do critério de exposição para Zonas mistas e Zonas Sensíveis.
- **Critério de incomodidade:** Na aplicação deste critério foram arbitradas algumas variáveis cujos valores não estavam disponíveis no estudo consultado.

De forma a ter em conta a situação mais gravosa, o parâmetro D foi considerado igual a 0 dB(A), ou seja, que a turbina funcionava em pelo menos 75% do tempo total do período de referência.

A constante $K_{\text{impulsivo}}$ tomou o valor de 0 dB(A), uma vez que não existem dados sobre a impulsividade do ruído e a probabilidade deste ruído ser impulsivo é baixa e a constante K_{tonal} tomou o valor 0 dB(A) uma vez que não se identificaram componentes tonais no estudo efetuado.

Na Fig. 81 podem observar-se a representação dos valores de ruído ambiente (RA) e de ruído residual (RR), dos limites legais do indicador L_n para zonas sensíveis (ZS) e para zonas mistas (ZM) e a diferença Δ entre o ruído ambiente e o ruído residual, assim como do respetivo valor legal máximo para o período diurno (Δ_{max}).

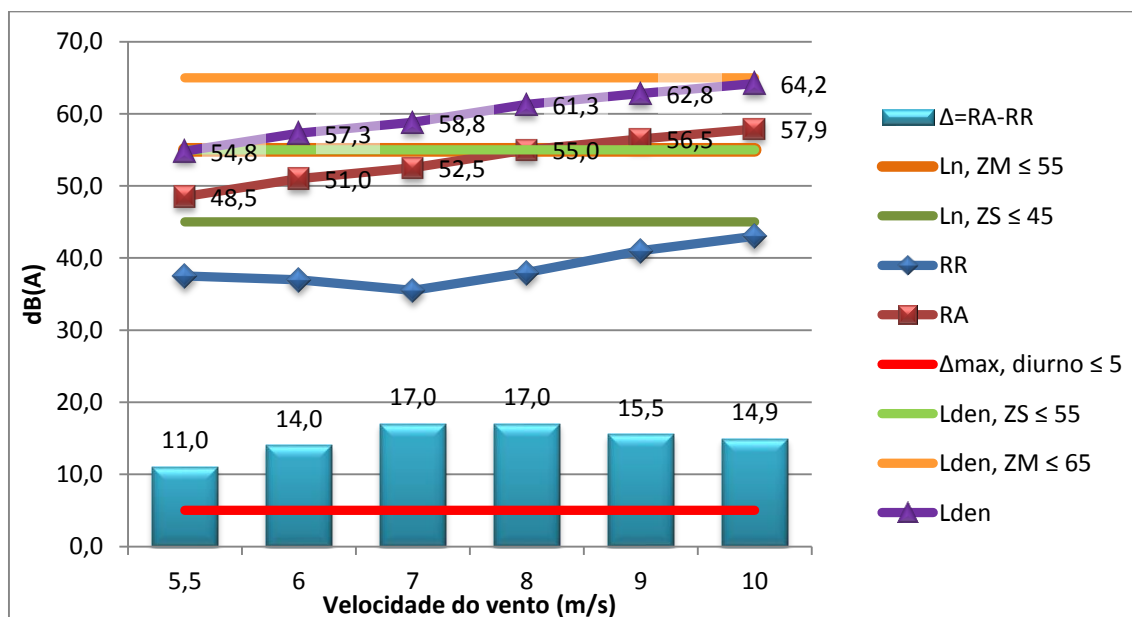


Fig. 81 - Níveis sonoros envolvidos na avaliação dos critérios de incomodidade e exposição para o aerogerador QR5 v1.2 VAWT.

O critério de exposição é cumprido apenas para velocidades de vento iguais ou inferiores a 8m/s em zonas mistas. No caso de zonas sensíveis este critério não é cumprido para nenhuma das velocidades de vento analisadas.

Verifica-se que o critério de incomodidade não é cumprido, em nenhum dos períodos de referência, para nenhuma das velocidades de vento.

6.2.6. CASO DE ESTUDO 5 (REINO UNIDO)

Apresentam-se agora os resultados e os procedimentos de medições de ruído efetuadas em duas instalações de aerogeradores de pequena dimensão, correspondendo uma a duas micro turbinas eólicas (Instalação d) e a outra a duas pequenas turbinas eólicas (Instalação b) [3], cujas características se apresentam no Quadro 12.

Quadro 12 – Características das turbinas eólicas [3].

Modelo	Micro Turbina	Pequena turbina
Potência nominal (kW)	0,6 (a 12,6 m/s)	5 (a 12 m/s)
Velocidade de rotação	1000 rpm	200 rpm
Número de pás	3	3
Diâmetro do rotor (m)	1,7	5,4
Velocidade de arranque (m/s)	3	3
Velocidade de paragem (m/s)	-	60
$L_{wd,8m/s}$ dB(A)	89,5	89,0

A Instalação d é constituída por duas turbinas de 0,6 kW (Td1 e Td2) montadas no topo de um edifício de habitação de oito pisos em ambiente urbano, tendo sido considerados três locais de medição (Md1 no topo do edifício, Md2 e Md3 ao nível do solo, como se pode observar na Fig. 82 (a).

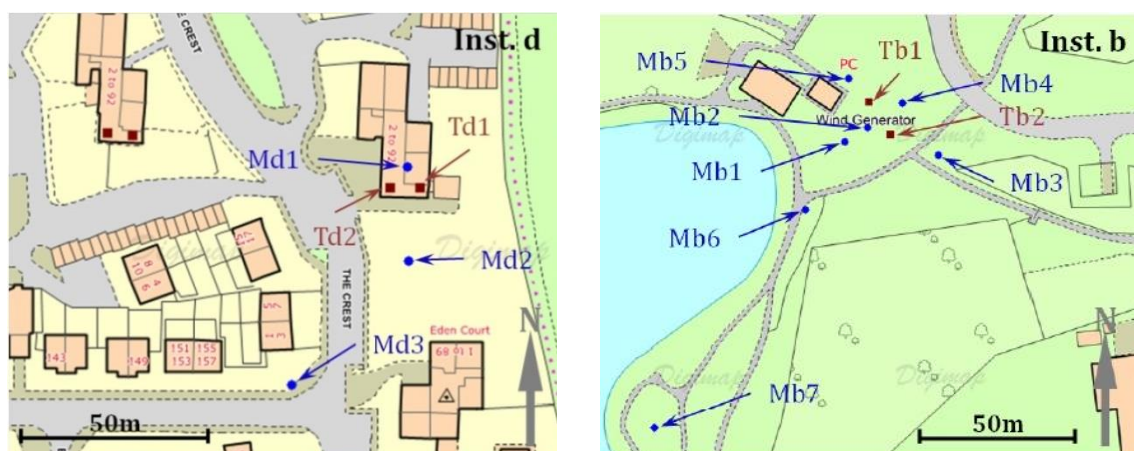


Fig. 82 - Localização dos aerogeradores (T) e dos pontos de medição (M): (a) na instalação d relativa às micro turbinas Td1 e Td2; (b) na instalação b relativa aos aerogeradores de pequena dimensão Tb1 e Tb2 [3].

A Instalação b, representada na Fig. 82 (b), localiza-se em ambiente rural e é constituída por duas turbinas eólicas de 5 kW (Tb1 e Tb2), rodeadas por alguns edifícios de pequena dimensão. A avaliação foi realizada com recurso a sete locais de medição, dos quais, quatro estão situados a montante da turbina relativamente à direção de vento dominante (Mb1, Mb2, Mb6, Mb7), tendo o local Mb7 sido usado para estimar o nível sonoro do ruído residual. Os três locais restantes consistem no local Mb4, a jusante da turbina relativamente à direção de vento dominante e nos locais Mb3 e Mb5, que relativamente à turbina se situam perpendicularmente à direção predominante do vento.

O Quadro 13 indica a distância entre os locais de medição (M) e o eixo rotor dos aerogeradores (T) em cada instalação.

Quadro 13 – Distâncias (em m) entre os locais de medição (M) e os aerogeradores (T) [3].

T / M	1	2	3	4	5	6	7
b1	27	17	27	16	13	43	127
b2	23	14	18	19	21	40	122
d1	12	28	63				
d2	14	29	65				

Apresenta-se de seguida a descrição do equipamento usado na realização das medições:

- Sonómetro da *Brüel & Kjaer* 2260 com microfone tipo 4189, colocado num tripé a uma altura de 1,4 m;
- Telémetro da *Bushnell X500* para medir a distância de cada local de medição ao eixo rotor do aerogerador;
- *Garmin eTrex H GPS*, um GPS usado para gravar os locais de medição como pontos de referência para possibilitar a repetição das medições;
- Gravador *Tascam DA-PI DAT* (digital audiotape) e microfone omnidirecional DPA do tipo 4060;
- Equipamento de medição de temperatura, velocidade de vento e humidade relativa da *Kestrel 4500 Pocket Weather Tracker*;
- Programa Noise Explorer Type 9815 usado para processar os dados das medições;
- Calibrador da B&K, tipo 4231.

O valor do nível sonoro contínuo equivalente L_{Aeq} foi medido para cada banda de 1/3 de oitava no espetro sonoro de 16 a 12500 Hz, com a constante de tempo *fast* e a ponderação do filtro A. As condições de calibração foram de 94 dB para a frequência de 1000 Hz.

Os níveis sonoros contínuos equivalentes foram calculados como a soma de todas as bandas de 1/3 de oitava.

Os resultados das medições realizadas na Instalação d, relativas ao local Md1, no topo do edifício apresentam-se na Fig. 83 com as turbinas em funcionamento (ruído ambiente) e desligadas (ruído residual) e para diferentes velocidades de vento.

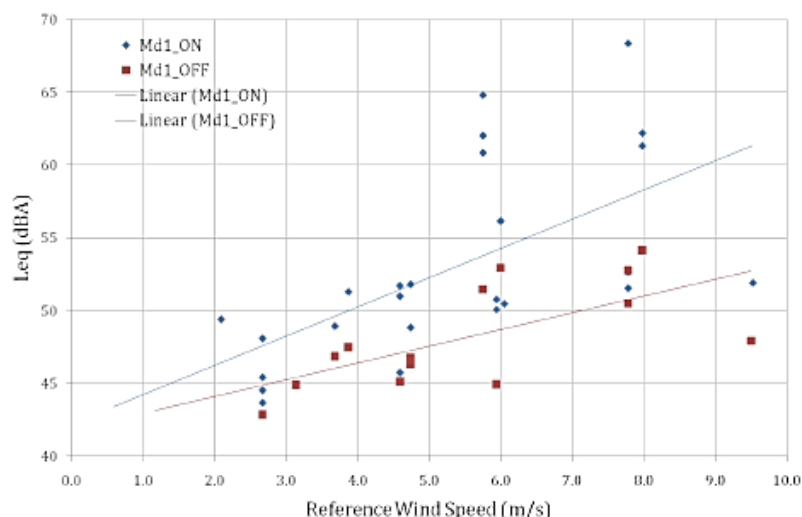


Fig. 83 – Dispersão mostrando a variação dos níveis sonoros com a velocidade de vento, na instalação d [3].

O espetro sonoro associado ao local de medições Md1 pode ser observado na Fig. 84.

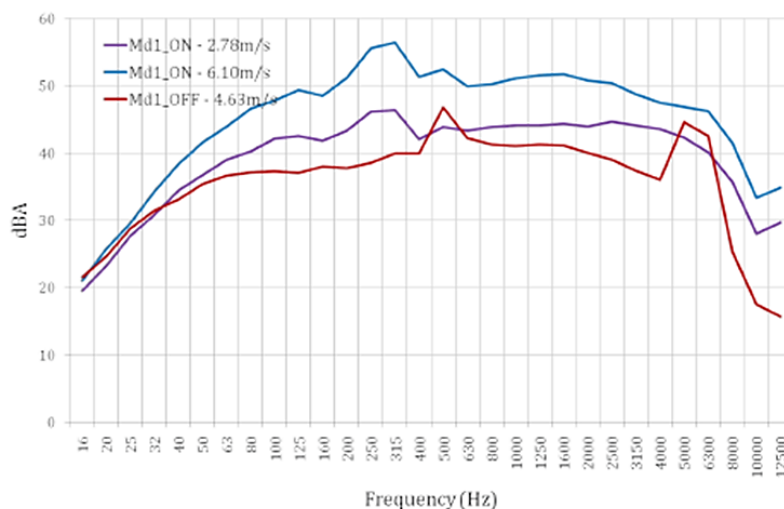


Fig. 84 – Medições com as turbinas em funcionamento e deligadas a velocidades de vento até 6,10 m/s na instalação d [3].

De forma a perceber se os limites dispostos no RGR seriam cumpridos, caso estes aerogeradores se instalassem em Portugal, verifica-se a aplicabilidade do critério de exposição e o critério de incomodidade para o local de medição **Md1**.

Critério de exposição: Devido ao não conhecimento do período de referência durante o qual se realizaram as medições e à falta de dados de níveis sonoros relativos aos três períodos de referência, bem como à falta de informação sobre as condições em que se realizaram as medições, como por exemplo, cuidados em evitar outros ruídos que não os da turbina, aplicou-se este critério considerando a situação mais gravosa em que os valores de ruído sonoro apresentados na Fig. 83 ocorreriam

durante o período noturno e analisou-se o cumprimento do critério de exposição para Zonas mistas e Zonas Sensíveis.

- **Critério de incomodidade:** Na aplicação deste critério foram arbitradas algumas variáveis cujos valores não estavam disponíveis no estudo consultado.

De forma a ter em conta a situação mais gravosa, o parâmetro D foi considerado igual a 0 dB(A), ou seja, que a turbina funcionava em pelo menos 75% do tempo total do período de referência.

A constante $K_{\text{impulsivo}}$ tomou o valor de 0 dB(A), uma vez que não existem dados sobre a impulsividade do ruído e a probabilidade deste ruído ser impulsivo é baixa, assim como a constante K_{tonal} , uma vez que a análise dos espectros correspondentes ao ruído ambiente para velocidades de vento de 2,78 e 6,10 m/s representados na Fig. 84 permite verificar que não existem componentes tonais.

Na Fig. 85 podem observar-se a representação dos valores de ruído ambiente (RA) e de ruído residual (RR), dos limites legais do indicador L_n para zonas sensíveis (ZS) e para zonas mistas (ZM) e a diferença Δ entre o ruído ambiente e o ruído residual, assim como do respetivo valor legal máximo para o período diurno (Δ_{max}).

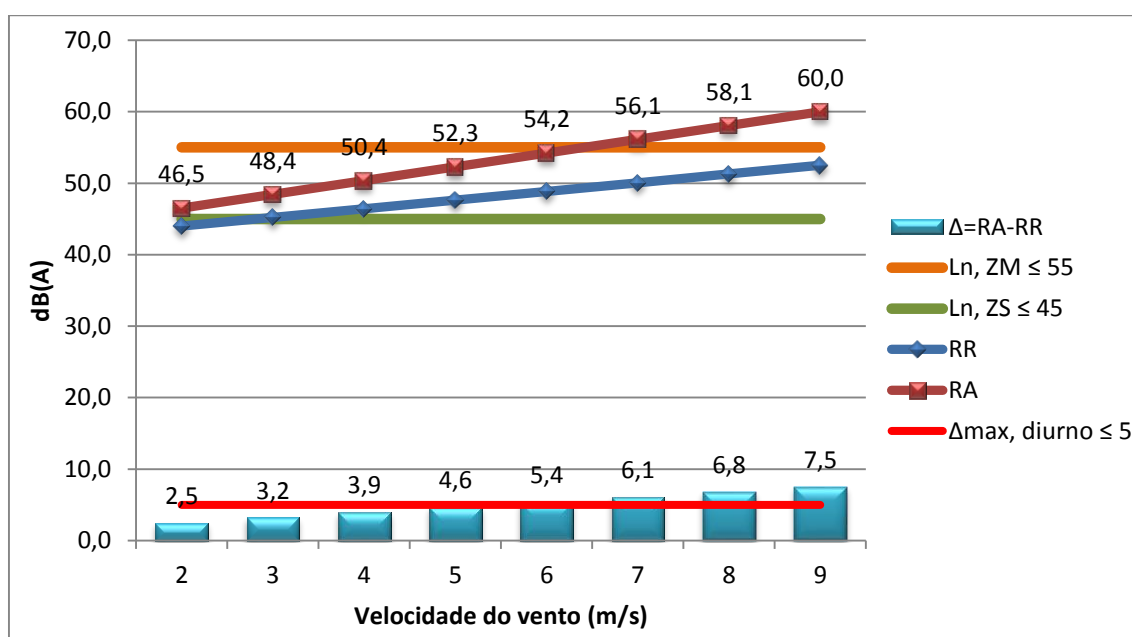


Fig. 85 - Níveis sonoros envolvidos na avaliação dos critérios de incomodidade e exposição dos aerogeradores Td1 e Td2.

Considerando que o nível sonoro ambiente indicado corresponde ao indicador de ruído noturno L_n e o aerogerador se encontra numa zona sensível, observa-se que o valor do RA ultrapassa o limite máximo de exposição para este indicador para velocidades de vento superiores a 2 m/s. Contudo era compatível com uma localização em Zona Mista para velocidades do vento que poderiam atingir os 6 m/s.

Relativamente ao critério de incomodidade, este é cumprido no período de referência diurno até velocidades de vento de 5 m/s, no período de entardecer até velocidades de 4 m/s, e no período noturno até velocidades de 3 m/s. Caso existissem componentes tonais, a K_{tonal} tomaria o valor de 3 dB(A) e o critério de incomodidade não era cumprido para nenhuma das velocidades de vento apresentadas.

De seguida apresentam-se os resultados das medições realizadas na Instalação b, relativas aos locais **Mb2**, **Mb6** e **Mb7**, tendo este último sido utilizado como local de medição do ruído residual. Na Fig. 86 podem observar-se para diferentes velocidades de vento os níveis de ruído em Mb6 e Mb2 e ainda no local Mb7, a uma distância suficiente dos aerogeradores para que o ruído por estes emitidos não tenha influência e possa ser considerado como ruído residual.

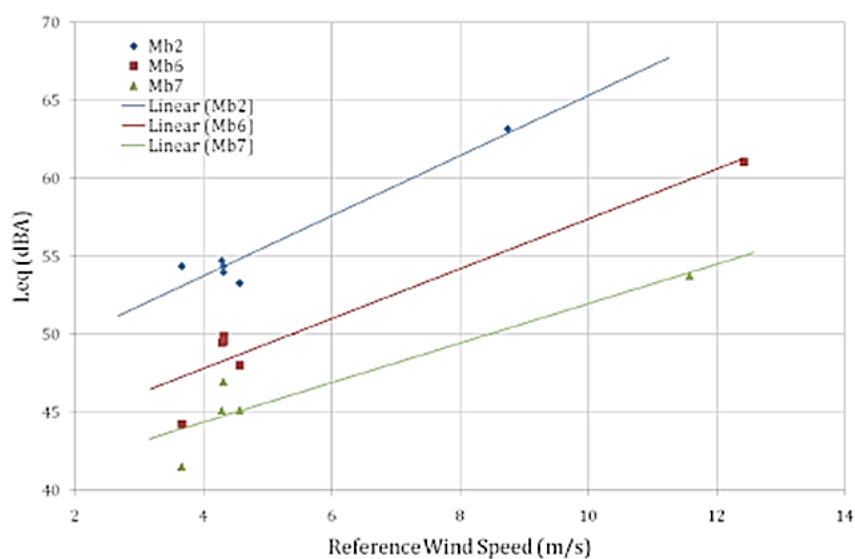


Fig. 86 – Dispersão mostrando a variação dos níveis sonoros nos locais Mb2, Mb6 e Mb7 com a velocidade de vento, na instalação b [3].

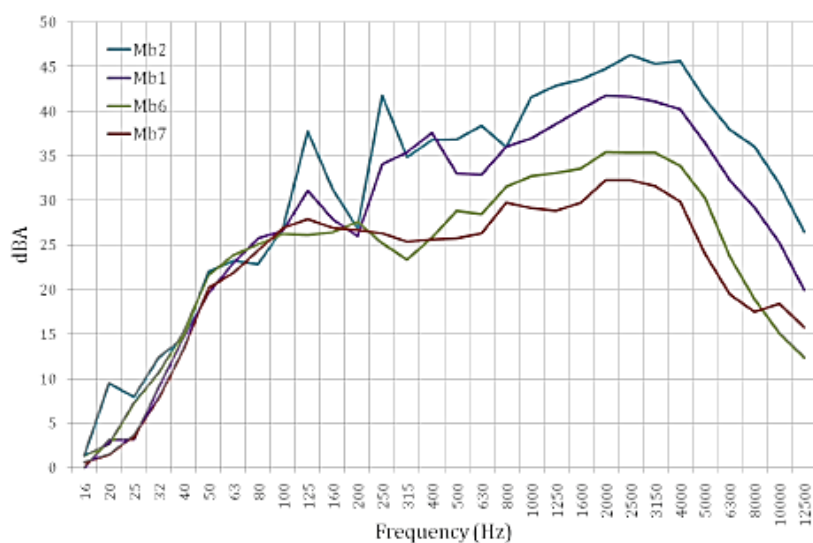


Fig. 87 – Níveis sonoros em Mb1, Mb2, Mb6 e Mb7, a uma velocidade de vento de ≈1,33 m/s dos aerogeradores Tb1 e Tb2 [3].

Os espectros sonoros relativo às medições efetuadas nos locais Mb2, Mb1, Mb6 e Mb7 podem ser visualizados na Fig. 87, para a velocidade de 1,33 m/s e na Fig. 88 para as velocidades de vento de 3,18, 4,21, 4,52 e 4,63 m/s.

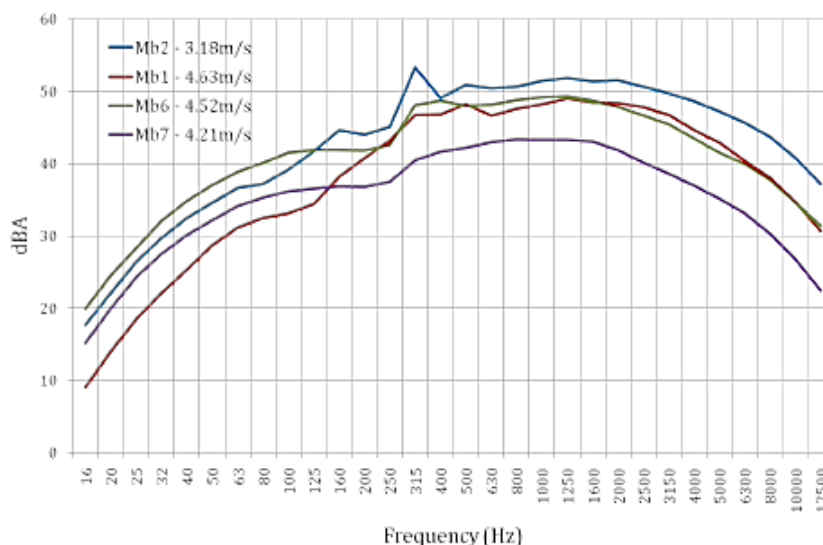


Fig. 88 - Níveis sonoros em Mb1, Mb2, Mb6 e Mb7 para as velocidades de vento indicadas para os aerogeradores Tb1 e Tb2 [2].

De forma a perceber se os limites dispostos no RGR seriam cumpridos, caso estes aerogeradores se instalassem em Portugal, verifica-se a aplicabilidade do critério de exposição e do critério de incomodidade para o presente caso nos locais de medição **Mb2** e **Mb6**.

- **Critério de exposição:** Devido ao não conhecimento do período de referência durante o qual se realizaram as medições e à falta de dados de níveis sonoros relativos aos três períodos de referência, bem como à falta de informação sobre as condições em que se realizaram as medições, como por exemplo, cuidados em evitar outros ruídos que não os da turbina, aplicou-se este critério considerando a situação mais gravosa em que os valores de ruído sonoro apresentados na ocorreriam durante o período noturno e analisou-se o cumprimento do critério de exposição para Zonas mistas e Zonas Sensíveis.
- **Critério de incomodidade:** Na aplicação deste critério foram arbitradas algumas variáveis cujos valores não estão disponíveis.

De forma a ter em conta a situação mais gravosa, o parâmetro D foi considerado igual a 0 dB(A), ou seja, que a turbina funcionava em pelo menos 75% do tempo total do período de referência.

A constante $K_{\text{impulsivo}}$ tomou o valor de 0 dB(A), uma vez que não existem dados sobre a impulsividade do ruído e a probabilidade deste ruído ser impulsivo é baixa. Analisando o espectro sonoro da Fig. 87, relativo ao local **Mb2** e a uma velocidade de vento de 1,33 m/s, verificou-se que as bandas de frequência de 125 Hz e 250 Hz sobressaem em pelo menos 5 dB(A) em relação às duas bandas adjacentes respetivas. O mesmo acontece para a banda de frequência de 315 Hz do espectro sonoro relativo

ao local **Mb2** e a uma velocidade de vento de 3,18 m/s, como se pode observar na Fig. 88. Desta forma a constante K_{tonal} tomou o valor 3 dB(A) para as velocidades de vento de 1 e 3 m/s correspondentes ao local **Mb2**. Nos restantes casos a K_{tonal} tomou o valor 0 dB(A) uma vez que não existem outras indicações relativas à existência de componentes tonais, neste estudo.

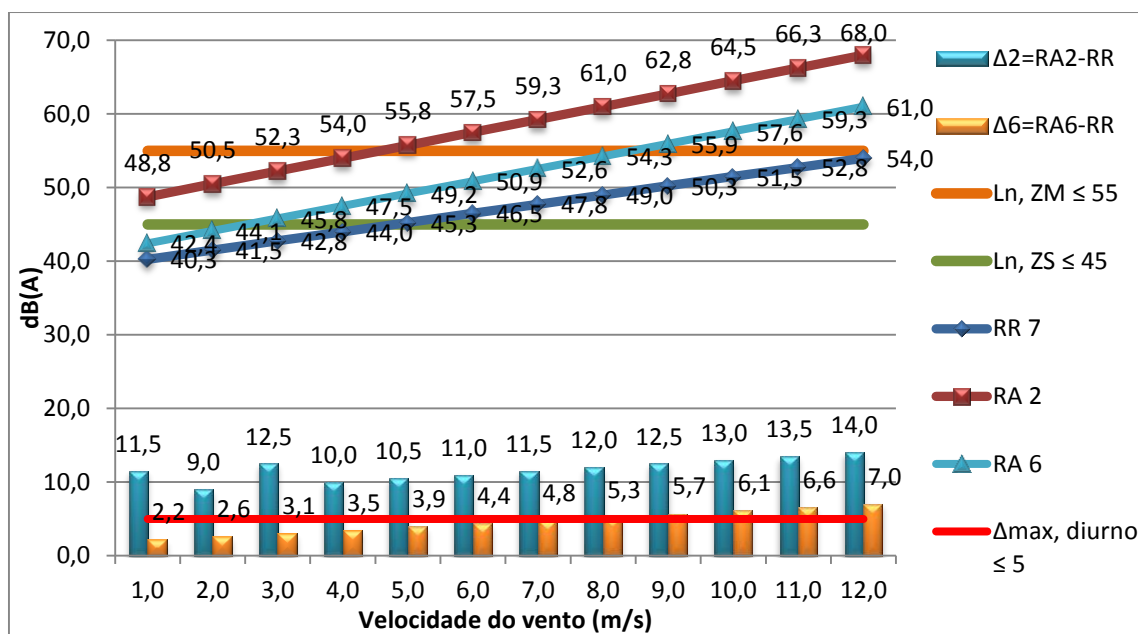


Fig. 89 - Níveis sonoros envolvidos na avaliação dos critérios de incomodidade e exposição dos aerogeradores Tb1 e Tb2.

Na Fig. 89 pode observar-se a representação dos valores de ruído ambiente relativos aos locais 2 (RA2) e 6 (RA6) e de ruído residual (RR7) correspondente ao local 7, dos limites legais do indicador L_n para zonas sensíveis (ZS) e para zonas mistas (ZM) e das diferenças entre o ruído ambiente dos locais 2 e 6 e o ruído residual, $\Delta 2$ e $\Delta 6$, respetivamente, assim como do respetivo valor legal máximo para o período diurno (Δ_{max}).

Considerando que o nível sonoro global indicado corresponderia ao indicador de ruído noturno L_n e o aerogerador se encontraria numa Zona Sensível, observa-se que o valor do nível sonoro de ruído ambiente no local 2 ultrapassa o limite máximo de exposição para todas as velocidades de vento e o ruído ambiente no local 6 excede este limite para velocidades superiores a 2m/s. Relativamente a Zonas Mistas este limite seria excedido para velocidades superiores a aproximadamente 4 e 8 m/s nos locais 2 e 6, respetivamente.

O critério de incomodidade não seria cumprido no local 2 para nenhum dos períodos de referência. Relativamente ao local 6, este critério seria cumprido em todos os períodos de referência apenas para as velocidades de vento de 1 e de 2 m/s e não seria cumprido em todos os períodos para velocidades superiores a 8 m/s.

O critério seria ainda cumprido no período diurno nas restantes velocidades de 3 a 7 m/s, inclusive, e também no período do entardecer para as velocidades de 3, 4 e 5 m/s.

6.3. CASOS DE ESTUDO PRÁTICOS

Neste subcapítulo apresenta-se a descrição dos casos práticos de estudo e da respetiva localização, bem como os resultados das respetivas medições de ruído e as condições gerais em que estas foram efetuadas.

Os casos práticos de estudo constituem dois aerogeradores de eixo horizontal: o primeiro consiste num sistema autónomo não interligado à REN localizado em ambiente rural e o segundo num aerogerador ligado à REN em ambiente urbano.

Descreve-se ainda o equipamento utilizado, os parâmetros analisados e o procedimento geral efetuado na realização das medições.

6.3.1. EQUIPAMENTO UTILIZADO NAS MEDIÇÕES

Na realização das medições o equipamento utilizado foi o seguinte:

- Sonómetro integrador tipo 1, da Brüel & Kjær, modelo 2260, com microfone condensador tipo 4188 para campo livre de ½ polegada e protetor de vento (Fig. 90);
- Calibrador, modelo 4231 da Brüel & Kjær (Fig. 91);
- Tripé que possibilita o posicionamento do sonómetro a uma altura de 1,5 m de altura acima do solo e tripé que possibilita o posicionamento do microfone a 4 m de altura (Fig. 102)
- Higo-termo-anemómetro digital, modelo HTA 4200 (Fig. 92).

As condições de calibração foram 94 dB para a frequência de 1000 Hz e a constante de tempo usada nas medições foi a *Fast*.

Todo o equipamento foi disponibilizado pelo Laboratório de Acústica da FEUP.



Fig. 90 - Sonómetro integrador da Brüel & Kjær 2260.



Fig. 91 - Calibrador de Nível Sonoro 4231.



Fig. 92 – Higro-Termo-Anemómetro HTA 4200, constituído por: unidade indicadora; cabeça de sonda com cabo de conexão; sonda de humidade / temperatura com cabo de conexão.

6.3.2. PARÂMETROS DE ANÁLISE

Os ensaios acústicos realizados serviram para avaliar o parâmetro, L_{Aeq} , ponderado pelo filtro A, de forma a obter resultados adequados à audição humana. Foram ainda obtidos os espectros por banda de 1/3 de oitava para as medições realizadas.

6.3.3. PROCEDIMENTO DE MEDIÇÃO SEGUNDO A NP ISO 1996

O procedimento seguido na realização das medições baseia-se na norma portuguesa NP ISO 1996 “Acústica – Descrição, medição e avaliação do ruído ambiente” – Parte 1: “Grandezas fundamentais e métodos de avaliação” [11] e Parte 2 – “Determinação dos níveis de pressão sonora do ruído ambiente” [88]. De seguida apresentam-se as condições em que se efetuaram as medições de ruído.

- Condições meteorológicas satisfatórias: céu parcialmente limpo e ausência de precipitação;
- A superfície das ruas encontrava-se seca;
- O anemómetro foi utilizado para medir a velocidade média de vento, a temperatura e humidade relativas em cada local de medição,
- A data das medições foi condicionada pelo funcionamento contínuo dos aerogeradores;
- O posicionamento do sonómetro foi condicionado pelo não impedimento da circulação de veículos e pessoas;
- O equipamento de medição foi colocado a pelo menos 3,5 m de distância de superfícies refletoras;
- Foram usados dois tripés que posicionaram o microfone a 1,5 m e 4 m de altura acima do solo;
- Dada a impossibilidade de desligar o aerogerador, o ruído residual foi medido noutra local de forma a reproduzir as condições que existiriam no local de medição do ruído ambiente, sem o aerogerador em funcionamento, ou seja, o ruído residual foi medido em locais a uma distância suficiente dos aerogeradores para que o ruído emitido por este não influenciasse as medições e com características de ruído e condições meteorológicas semelhantes às dos outros locais de medição.

- Efetuou-se o registo fotográfico dos locais analisados.

Devido à natureza deste trabalho foram efetuadas algumas exceções à norma NP ISO 1996 que se enumeram de seguida:

- As medições realizaram-se em dias com condições meteorológicas favoráveis ao funcionamento dos aerogeradores, nomeadamente, velocidades de vento, aproximadamente constantes e direcionais e que no caso de estudo prático 1 excederam os 5 m/s;
- Os tempos de medição foram determinados pela estabilização do nível de pressão sonora contínuo equivalente e foram efetuadas interrupções durante o período de medição, sempre que existia ruído proveniente de fontes sonoras que mascaravam o ruído do aerogerador ou ruído proveniente de acontecimentos discretos, como passagens de veículos e pessoas e ruído emitido por animais e equipamentos no local;
- Usaram-se tempos de medição de 10 minutos e por vezes de apenas 5 minutos por impossibilidade de continuar a medição em condições de ruído ambiente semelhantes.

6.3.4. CASO DE ESTUDO 1: (OURA – CHAVES)

O primeiro caso de estudo consiste num aerogerador de pequena dimensão de eixo horizontal, do tipo *upwind*, possuindo um sistema passivo de orientação, com um “cata-ventos”, que se apresenta na Fig. 93. O aerogerador possui três pás, e encontra-se montado numa torre de aproximadamente 5 m de altura. Não foi possível obter as especificações técnicas exatas deste aerogerador. Contudo tendo em conta os aerogeradores existentes no mercado, o aerogerador em estudo corresponde a um dos aerogeradores da gama *Whisper*, cujas especificações técnicas gerais se apresentam no Quadro 14.

Quadro 14 – Especificações técnicas de aerogeradores *Whisper* (Oura – Chaves) [89] .

Modelo	<i>Whisper 100</i>	<i>Whisper 200</i>	<i>Whisper H-40</i>	<i>Whisper H-80</i>
Eixo	Horizontal	Horizontal	Horizontal	Horizontal
Potência nominal (kW)	0,9 (a 12,5m/s)	1 (a 12m/s)	0,9 (a 12,5m/s)	1 (a 10,5 m/s)
Velocidade de arranque (m/s)	3,4	3,1	3,4	3,1
Mecanismo de proteção	<i>Furling</i>	<i>Furling</i>	<i>Furling</i>	<i>Furling</i>
Número de pás	3	3	3	3
Diâmetro do rotor (m)	2,1	2,7	2,1	3,0
Mecanismo de orientação	“Cata-ventos”	“Cata-ventos”	“Cata-ventos”	“Cata-ventos”



Fig. 93 – Caso de estudo prático 1 (Oura – Chaves).

O aerogerador situa-se no concelho de Chaves, na freguesia de Oura, a uma distância de 22 m da estrada nacional N2, sendo o tráfego rodoviário desta via a principal fonte sonora do local, como se pode observar na Fig. 94, onde os pontos vermelhos representam os locais de medição, ponto amarelo a localização do aerogerador **c1** e a seta a branco a direção predominante de vento – aproximadamente de Sul. A direção do vento foi percebida no local de medição e tendo em conta que a turbina do tipo *upwind* se encontrava “virada” para sul.



Fig. 94 - Localização do aerogerador a que corresponde o caso de estudo prático 1, a amarelo e dos locais de medição, a vermelho (Oura – Chaves).

As características do solo são as seguintes: gravilha e vegetação. Não existem habitações num raio de aproximadamente 700 m dos locais de medição e o local apresenta um ruído residual baixo quando não existe ruído de tráfego.

O local de medição **M1** situa-se a aproximadamente 8 m do aerogerador e a mais de 3,5 m de superfícies refletoras existentes no local, como se pode observar na Fig. 95, à esquerda. O local da medição foi escolhido de forma a localizar-se o mais próximo do aerogerador no sentido da propagação do vento, tendo sido impossível executar a medição exatamente no alinhamento da direção do vento com o aerogerador, uma vez que o local é de difícil acesso e apresenta um desnível relativamente à plataforma onde se encontra o aerogerador.

O local de medição **M2** representa o ruído residual do local, uma vez que foi impossível desligar o aerogerador e proceder à medição de ruído residual desta forma. Este local situa-se a aproximadamente 80 m do aerogerador, na direção oposta à direção da propagação de vento predominante e apresenta condições meteorológicas similares às do local de medição 1, como se pode observar na Fig. 95, à direita. Neste local o ruído do aerogerador não era audível.



Fig. 95 – Local de medição 1 (à esquerda) e local de medição 2 (à direita) indicados pelas setas a laranja (Oura – Chaves).

As medições de ruído foram realizadas no dia 24 de Maio de 2014, no período de referência de diurno e sem influência de ruído do tráfego rodoviário. Apesar do tráfego rodoviário ser pontual e o número de passagens de veículos ser baixo, o ruído de tráfego mascarava o ruído emitido pelo aerogerador e, por conseguinte, as medições foram interrompidas a partir do momento em que o ruído de tráfego era perceptível e até que este se extinguia, de forma a obter resultados mais fiáveis de medição do ruído proveniente do aerogerador.

O microfone foi colocado num tripé a 4 m de altura e o aerogerador funcionou de forma contínua durante as medições. O valor da temperatura e humidade registados no local pelo higo-termo-anenómetro foram de 21 °C e 50,5%, respetivamente, e a velocidade média de vento de 6 m/s, medida a, aproximadamente, 2 m acima do solo.

No Quadro 15 apresentam-se os resultados obtidos nos dois locais de medição para o parâmetro L_{Aeq} . Apresentam-se igualmente a duração e a hora de realização das medições.

Quadro 15 - Valores obtidos nas medições nos locais designados de 1 a 2 (Oura – Chaves).

Local de Medição	Distância ao Aerogerador (m)	Data	Hora	Duração (min.)	Parâmetro L_{Aeq} (dB)
M1	8	24 / 5 / 2014	17h32	15	56,2
M2 (residual)	80	24 / 5 / 2014	18h40	10	41,5

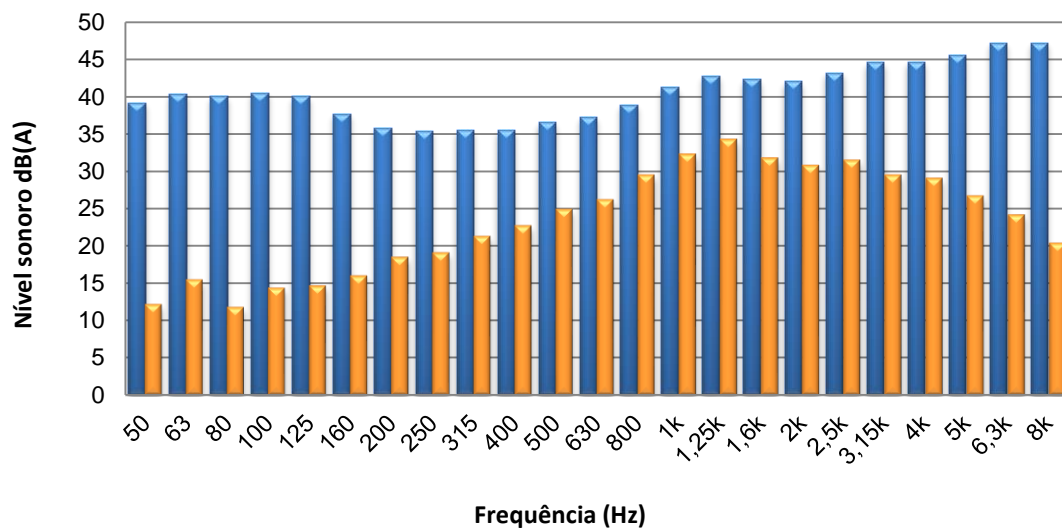


Fig. 96 – Espectro sonoro do ruído ambiente (a azul) e do residual (a laranja) (Oura – Chaves).

Na Fig. 96 representa-se o espectro sonoro em dB(A), na gama dos 50 aos 8000 Hz, para as medições realizadas.

De forma a perceber se os limites dispostos no RGR seriam cumpridos é avaliado de seguida o cumprimento do critério de exposição e do critério de incomodidade para o presente caso:

Critério de exposição: As medições de ruído foram realizadas durante o período diurno, uma vez que as condições de vento satisfatórias ao funcionamento do aerogerador não se verificaram nos outros períodos nos dias em que houve disponibilidade de realizar as medições por parte do Laboratório de Acústica da FEUP. Tendo em conta que o ruído de tráfego e outras fontes sonoras como, por exemplo, o ruído pontual provocado por pessoas e animais não influenciou as medições de ruído, os níveis sonoros medidos nos diferentes períodos de referência seriam similares e não existiria uma diferença significativa entre os resultados que se obteriam nos três períodos do dia. Desta forma calculou-se o valor do indicador L_{den} através da expressão 8, considerando que os indicadores L_e e L_n tomariam o mesmo valor do indicador L_d obtido nas medições efetuadas. Considerou-se ainda a situação mais gravosa em que o nível sonoro obtido corresponderia ao indicador de ruído noturno L_n , e fez-se a análise deste critério para Zonas Sensíveis e para Zonas Mistas, uma vez que não foi possível obter a carta de condicionantes de Chaves e classificar a zona quanto ao ruído.

- **Critério de incomodidade:** Na aplicação deste critério foi arbitrado o valor da variável D, que foi considerado igual a 0 dB(A), situação mais gravosa, em que o aerogerador se encontraria em funcionamento durante pelo menos 75% do tempo de referência.

A constante $K_{impulsivo}$ tomou o valor de 0 dB(A), uma vez que se verificou que: $L_{AIm} - L_{Aeq} = 1,2 < 6$ dB(A) e a K_{tonal} tomou o valor 0 dB(A) uma vez que se verificou, através da análise do espectro sonoro do ruído ambiente, que não existem componentes tonais.

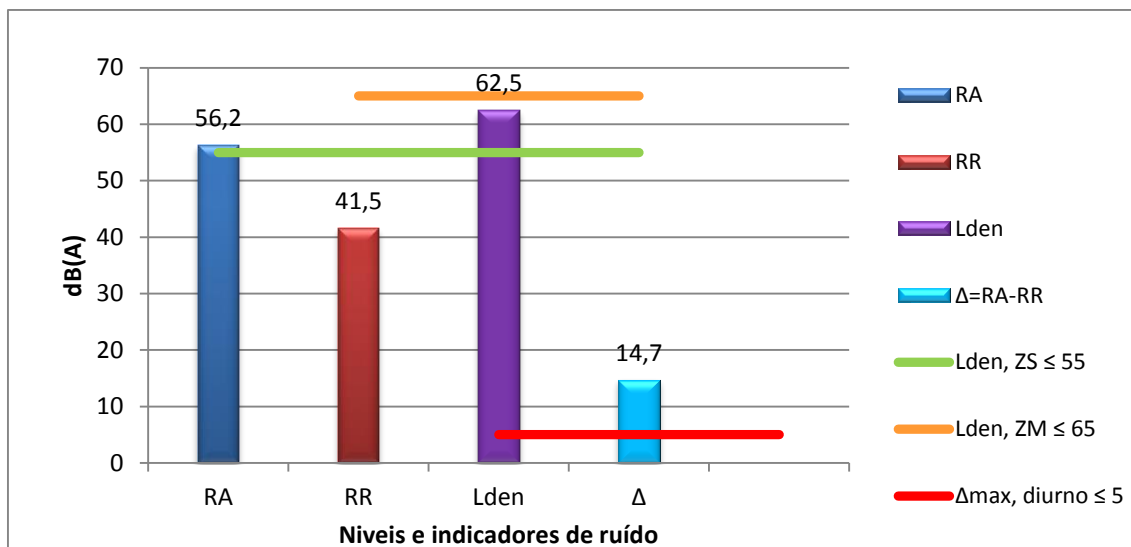


Fig. 97 - Representação gráfica dos níveis sonoros envolvidos na avaliação dos critérios de incomodidade e exposição (Oura – Chaves).

Na Fig. 97 pode observar-se a representação dos valores de ruído ambiente (RA) e de ruído residual (RR), do valor do indicador L_{den} , dos limites legais do indicador L_n e L_{den} para zonas sensíveis (ZS) e para zonas mistas (ZM) e a diferença Δ entre o ruído ambiente e o ruído residual, assim como do respetivo valor legal máximo para o período diurno (Δ_{max}), para uma velocidade de vento média de 6 m/s.

Analisando o valor do indicador L_{den} , verifica-se que este cumpre o critério de exposição para Zonas Mistas, mas não para Zonas Sensíveis. Considerando que o valor do RA corresponderia ao indicador L_n verifica-se que o limite máximo de exposição não seria cumprido no período noturno, para nenhum tipo de zona, no local de medição M1, a 8 m da turbina e a uma velocidade de vento de 6 m/s. O critério de incomodidade também não seria cumprido neste local, em nenhum dos períodos de referência.

A uma distância de aproximadamente 80 m do local, ou seja, sem a influência do ruído emitido pelo aerogerador, o critério de exposição seria cumprido tanto para Zonas Sensíveis como para Zonas Mistas.

6.3.5. CASO DE ESTUDO 2: MINDELO

O segundo caso de estudo consiste num aerogerador de pequena dimensão de eixo horizontal, do tipo *downwind* com um sistema passivo de orientação, que se apresenta na Fig. 98. O aerogerador possui três pás e encontra-se montado numa torre de aproximadamente 10 m de altura. As especificações exatas deste aerogerador não se encontravam disponíveis, contudo tendo em conta os aerogeradores presentes no mercado pode classificar-se este aerogerador como sendo do tipo *Skystream 3.7*. As características do modelo *Skystream 3.7* apresentam-se no Quadro 16.

Quadro 16 – Especificações técnicas do aerogerador *Skystream 3.7* (Mindelo) [90]

Modelo	<i>Skystream 3.7</i>
Potência nominal	2,4 kW
Velocidade nominal	13 m/s
Velocidade de arranque	3,5 m/s
Velocidade de paragem	25 m/s
Mecanismo de proteção	Sistema eletrónico de <i>Stall</i>
Mecanismo de Orientação	Passivo
Número de pás	3
Diâmetro do rotor	3,72 m
Área de energia incidente de vento	10,87 m ²

O aerogerador situa-se no concelho de Vila do Conde, na freguesia de Mindelo em meio urbano na Rua Infante Dom Henrique, no interior de uma propriedade com uma habitação situada a aproximadamente 100 m da costa, como se pode observar na Fig. 99, onde o ponto a azul representa a localização do aerogerador. A malha urbana da envolvente é constituída maioritariamente por edifícios habitacionais de 1, 2 e 3 pisos. As principais fontes sonoras do local de estudo são o ruído proveniente do oceano e do tráfego rodoviário local, muito escasso.



Fig. 98 – Caso de estudo prático 2 (Mindelo)



Fig. 99 – Localização do caso de estudo prático 2 (Mindelo)

As medições de ruído foram realizadas no dia 28 de Maio de 2014, no período de referência diurno e sem a influência de ruído de tráfego rodoviário ou outras fontes sonoras que mascarassem o ruído proveniente do aerogerador. O sonómetro foi posto em pausa a partir do momento em que, por exemplo, o ruído de tráfego ou o ruído de pessoas e animais era perceptível e até que este se extinguia, de forma a obter resultados mais fiáveis da medição de ruído emitido pelo aerogerador. As medições foram efetuadas com o microfone colocado num tripé a 1,5 m e a 4 m de altura. A fonte sonora funcionou de forma contínua e praticamente com a mesma velocidade de rotação durante o decorrer de todas as medições.

O valor da temperatura e humidade relativa registados no local pelo higró-termo-anemómetro são de aproximadamente 20 °C e 80%, respetivamente. A direção de vento predominante era de - Nor-noroeste, entre as 15h00 e as 20h00 do dia 31 de Maio, de acordo com o portal *World Weather Online* [91] para o local – Vila do Conde.

Na Fig. 100 apresenta-se o mapa com a localização do aerogerador **c2**, a amarelo, e de cada uma das medições **M1**, **M4**, **M5**, **M6**, **M7**, **M8**, **M9**, **M10** e **M11** e no Quadro 17 apresentam-se os resultados obtidos nos diferentes locais de medição, para o parâmetro L_{Aeq} em dB(A).

As medições foram efetuadas com o microfone posicionado a 4 m de altura em todos os locais de medição e ainda a 1,5 m de altura nos locais **M8** e **M10**, de forma a melhor caracterizar a incomodidade sonora à altura média acima do solo de um ouvinte.

Apresentam-se igualmente as durações e a hora em que se realizaram as medições, bem como a velocidade média de vento no local da medição e, no Quadro 18, indicam-se as distâncias de cada local de medição à costa.

Quadro 17 – Valores obtidos nos vários locais de medição.

Local de Medição	Distância ao Aerogerador (m)	Data	Hora	Duração (min.)	Parâmetro L_{Aeq} (dB(A))
M1	8	31/5/2014	15:35:28	10	61,4
M3	166	31/5/2014	16:14:05	3	63,9
M4	70	31/5/2014	16:44:15	10	51,9
M5	62	31/5/2014	17:11:29	10	53,1
M6 (residual)	372	31/5/2014	17:33:30	5	52,3
M7	53	31/5/2014	17:58:10	9	55,8
M8*	58	31/5/2014	18:28:10	10	57,0
M9	58	31/5/2014	18:45:52	10	58,4
M10*	8	31/5/2014	19:06:51	5	60,8
M11	8	31/5/2014	19:23:03	6	61,6



Fig. 100 - Localização do caso de estudo 2 e dos onze locais de medição (Mindelo).

Quadro 18 – Distância de cada local de medição à linha da costa (Mindelo).

Local de Medição	Distância ao Aerogerador (m)	Distância à linha da costa (m)	Velocidade média de vento (m/s)
M1	8	100	2,3
M2	170	120	6,6
M3	165	105	6,6
M4	67	140	2,3
M5	62	122	3,3
M6 (residual)	372	150	2,7
M7	53	150	5,6
M8*	58	150	5,6
M9	58	150	5,6
M10*	8	100	2,2
M11	8	100	2,2

Uma das condicionantes na escolha da localização dos locais de medição foi o facto de a zona se situar a poucos metros da costa, cujo ruído influencia as medições à medida que nos afastamos ou aproximamos desta. Este é muito mais intenso à medida que nos aproximamos da costa. Outra condicionante foi o facto dos locais de medição se situarem numa urbanização em malha quadrada e perpendicular à linha de costa, o que resulta em canais de vento de diferentes velocidades em cada uma das ruas. O ruído provocado pelo vento aumenta com o aumento da velocidade do próprio vento, influenciando bastante o ruído ambiente na zona. Nas Fig. 101, Fig. 102, Fig. 103 e Fig. 104 podem observar-se alguns dos locais de medição.



Fig. 101 – Locais de medição M1, M10 e M11 (Mindelo).



Fig. 102 – Local de medição M4 (Mindelo).



Fig. 103 – Local de medição M6 (Mindelo).



Fig. 104 – Local de medição M9 (Mindelo).

De seguida analisam-se e comparam-se os valores de L_{Aeq} obtidos nos locais de medição estudados e apresentados no Quadro 17 através do qual se pode constatar-se que o local de medição M11 é o local mais ruidoso e que o local de medição M4 o mais tranquilo.

O local de medição M1 situa-se a 8 m do aerogerador numa rua perpendicular ao oceano e com saída diretamente para a praia, sendo este a principal fonte sonora contínua do local para além do aerogerador.

Os locais de medição M2 e M3 encontravam-se muito expostos em relação à costa e foram usados apenas como referência de velocidades de vento nesses locais, que se revelaram bastantes elevadas relativamente às velocidades de ventos da maior parte dos outros locais de medição. Para além disto nestes locais o ruído do aerogerador não era audível, tendo sido por isso excluídos da análise de ruído e sendo usado apenas o ponto M3 como indicação do nível de ruído ambiente nesse local.

O local de medição M4 encontra-se na Rua dos Navegadores, a 70 m do aerogerador e a jusante da direção de propagação de vento dominante relativamente ao aerogerador e onde o ruído deste ainda era audível. O valor do nível sonoro neste local foi de 51,9 dB(A), verificando-se uma redução $\Delta=9,5$ dB(A) relativamente ao local M1. Esta redução deve-se ao aumento da distância ao aerogerador relativamente ao local M1 mas também ao facto da distância à costa ser mais elevada em cerca de 40 m relativamente ao local M1. O facto de ser praticamente impossível realizar medições a distâncias crescentes do aerogerador e ao mesmo tempo a distâncias iguais à linha da costa, devido às características da malha da urbanização, e ainda a velocidades de vento semelhantes, sem possibilidade de desligar a turbina, torna difícil esta análise.

O local de medição M5 situa-se na Rua de Sagres a uma distância de 62 m do aerogerador, a jusante da direção de propagação de vento dominante, relativamente ao aerogerador e a uma distância da costa de 122 m, cerca de 5 m e 18 m mais próximo do aerogerador e da linha da costa, respetivamente, do que o local M4. O nível sonoro deste local sofre um acréscimo $\Delta=1,2$ dB(A) em relação ao local M4.

Dada a impossibilidade de desligar o aerogerador, o local de medição do “ruído residual” foi escolhido tendo em conta o seguinte: O ruído do aerogerador não era audível, a distância ao aerogerador era superior a 100 m e situava-se fora da direção de propagação dominante (orientação favorável do vento) relativamente ao aerogerador, as condições meteorológicas eram semelhantes e o ruído proveniente de fontes sonoras, com exceção do aerogerador, aproximadamente idêntico. Sendo a fonte sonora dominante a do oceano, tentou-se que este local estivesse aproximadamente à mesma distância da costa que a dos outros pontos de medição, de forma a reproduzir o ruído residual que existiria nos locais de medição próximos do aerogerador, se este pudesse ser desligado.

Os locais correspondentes às medições M1, M4, M5, M10 e M11 apresentam velocidades de vento semelhantes às do local de medição M6 (local de medição de ruído residual) variando no máximo em $\approx 0,66$ m/s relativamente à velocidade do local de medição M6, sendo por isso mais correto comparar os resultados destes três locais entre si e com o ruído residual. Por sua vez os locais M8, M9 e M10 apresentam velocidades de, aproximadamente, o dobro da velocidade correspondente ao local M6, o que pode influenciar os resultados, aumentando o nível sonoro nestes locais.

Os níveis sonoros dos locais M1 e M5 excedem o nível sonoro residual em 9,1 dB(A) e 3,8 dB(A), respetivamente, enquanto o nível sonoro do local M4 é inferior ao nível sonoro residual. Isto deve-se ao facto de, no local 6, não se terem conseguido realizar as medições em condições suficientemente semelhantes ao local M4. Apesar da distância à costa do local M4 ser ligeiramente menor que do residual (local M6), e da influência do ruído do aerogerador neste local, a velocidade de vento por sua vez em M4 é ligeiramente menor do que a velocidade de vento no local M6, o que pode ter influenciado o resultado do nível sonoro.

Os locais de medição M7 e M9 localizam-se na Rua Gonçalo Zarco perpendicularmente à direção da propagação do vento relativamente ao aerogerador. A velocidade de vento nestes locais é de aproximadamente o dobro da velocidade média de vento nos locais das medições M4, M5. Apesar de localizados a distâncias do aerogerador ligeiramente inferiores ao aerogerador e a distâncias ligeiramente superiores à costa do que os locais M4 e M5, fatores que equilibrariam o nível sonoro destes dois grupos de locais, a velocidade de vento nos locais M7, e M9 é de aproximadamente o dobro da velocidade dos locais M4 e M5, como foi referido, resultando em maiores níveis sonoros nos locais M7 e M9, que excedem os níveis dos locais M4 e M5.

Apesar dos locais M7 e M9 se encontrarem na mesma rua com velocidades de vento iguais e a uma distância entre si de 12 m, o local de medição M9 apresenta um nível sonoro mais elevado que excede o nível sonoro do local M7 em 2,6 dB(A). Isto deve-se ao facto de o local M9, embora mais afastado do aerogerador, ser influenciado pelo ruído do oceano a Norte e a Noroeste deste ponto, uma vez que se encontra menos resguardado pelos edifícios existentes.

As medições M8 e M9 foram efetuadas no mesmo local mas para posições do microfone de 4 m e 1,5 m de altura acima do solo. Verificou-se que o nível sonoro obtido a 1,5 m de altura é de cerca de 57,0 dB(A) enquanto a 4 m do solo este valor é de 58,4 dB(A). A diferença $\Delta = 1,4$ m pode estar relacionada com o facto de a velocidade de vento aumentar com a altura acima do solo, contudo a existência de edifícios neste local faz com que este aumento de velocidade só aconteça a partir de uma determinada altura acima do solo. Outro aspeto a ter em conta é o facto de, a 4 m de altura, a propagação do ruído do oceano conseguir “contornar” melhor os obstáculos existentes, como muros de aproximadamente 2 m de altura e edifícios de 1 piso, o que acontece no local das medições M8 e M9.

Por último descrevem-se os locais de medição M10 e M11. As medições M10 e M11 foram efetuadas no local de medição M1 em condições meteorológicas idênticas e com um intervalo temporal de 10 minutos. Na realização da medição M10 o microfone foi colocado a 1,5 m de altura e a medição M11 a 4 m de altura e os resultados de nível sonoro desta última medição excedem em 0,8 dB(A) o nível sonoro da medição M10, que se deve ao facto de o microfone estar mais próximo em cerca de 2,5 m da altura do aerogerador.

Apesar de a temperatura registada aquando da realização da medição M1 ser 2 °C superior à registada aquando da medição M11 e a Humidade Relativa ser aproximadamente 9% mais elevada, os níveis sonoros de M1 e M11 apresentam uma diferença de apenas 0,2 dB(A).

De seguida é avaliado o cumprimento dos critérios de exposição e de incomodidade para o presente caso nos vários locais de medição:

- **Critério de exposição:** As medições de ruído foram realizadas durante o período diurno. Tendo em conta que o ruído de tráfego e outras fontes sonoras como, por exemplo, o ruído pontual provocado por pessoas e animais não influenciou as medições de ruído, os níveis medidos nos diferentes períodos de referência seriam similares. Desta forma calculou-se o valor do indicador L_{den} através da expressão 8, considerando que os indicadores L_e e L_n tomariam o mesmo valor do indicador L_d obtido nas medições efetuadas. Considerou-se ainda a situação mais gravosa em que o nível sonoro obtido corresponde ao indicador de ruído noturno L_n e fez-se a análise deste critério para Zonas Sensíveis e para Zonas Mistas, uma vez que não foi possível obter a carta de condicionantes de Vila do Conde e classificar a zona quanto ao ruído.

Os valores obtidos são amostras do nível sonoro que não traduzem o valor que se obteria para o período de tempo estabelecido para o parâmetro L_{den} , servindo apenas de indicação sobre a situação sonora do local.

- **Critério de incomodidade:** Na aplicação deste critério foi arbitrado o valor da variável D, que foi considerado igual a 0 dB(A) uma vez que o aerogerador se encontrou em funcionamento de forma contínua durante o período de referência diurno.

A constante $k_{impulsivo}$, tomou o valor de 0 dB(A) uma vez que a diferença, $L_{AIm}-L_{Aeq}$, foi inferior a 6 dB(A) para todos os locais de medição e a constante k_{tonal} tomou o valor de 0 dB(A), uma vez que se não verificaram componentes tonais nos respetivos espectros sonoros, que se encontram em anexo.

Na Fig. 105 pode observar-se a representação dos valores do indicador L_{den} , de ruído residual (RR), correspondente ao local de medição M6, e de ruído ambiente (RA) dos locais de medição apresentados e que nesta análise corresponde ao L_n , bem como dos limites legais dos indicadores L_{den} e L_n para zonas sensíveis (ZS) e para zonas mistas (ZM).

Verifica-se que o limite máximo de exposição do indicador L_{den} é excedido em todos os locais de medição indicados na Fig. 105 para Zonas Sensíveis, sendo cumprido apenas nos locais M4, M5, M7, M8 e M9 no caso de Zonas Mistas. Os locais que não cumprem o critério no caso de Zonas Mistas localizam-se muito próximos do aerogerador relativamente aos outros locais, a cerca de 8 m de distância.

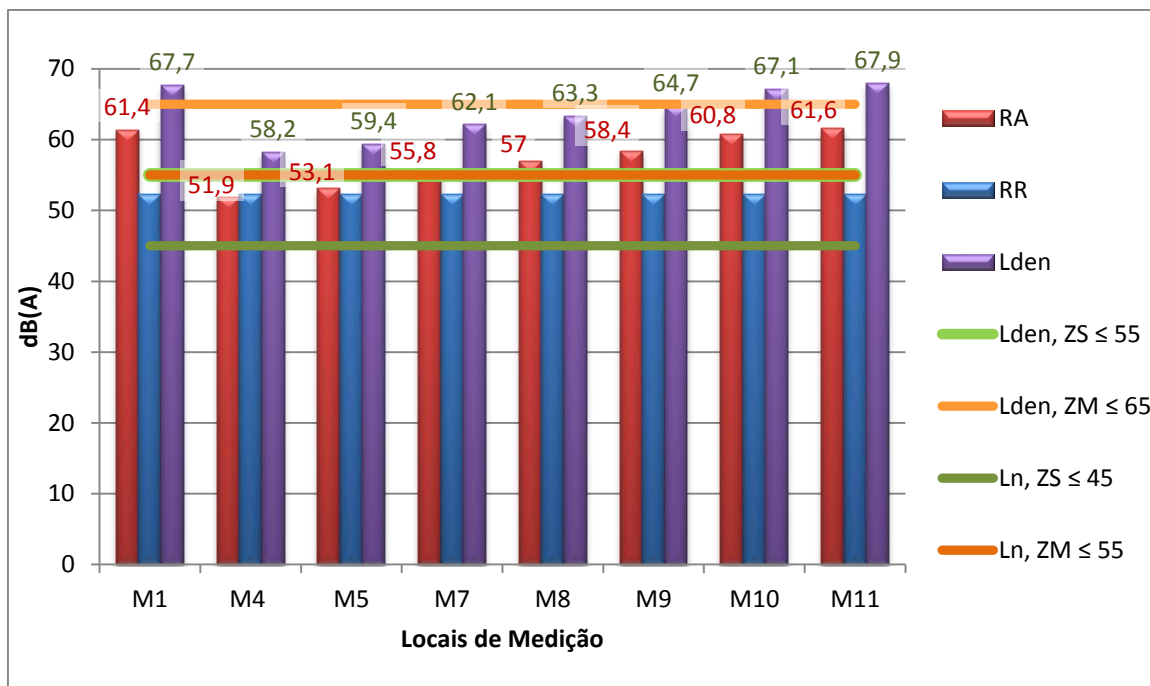


Fig. 105 - Níveis sonoros envolvidos na avaliação do critério de exposição (Mindelo).

Caso os valores de ruído ambiente indicados tivessem sido obtidos durante o período noturno, verificar-se-ia que os valores correspondentes a todos os locais de medição excederiam o limite máximo de exposição para este período, no caso de Zonas Sensíveis. No caso de Zonas Mistas apenas os locais M4 e M5 cumpririam o limite legal do indicador L_n .

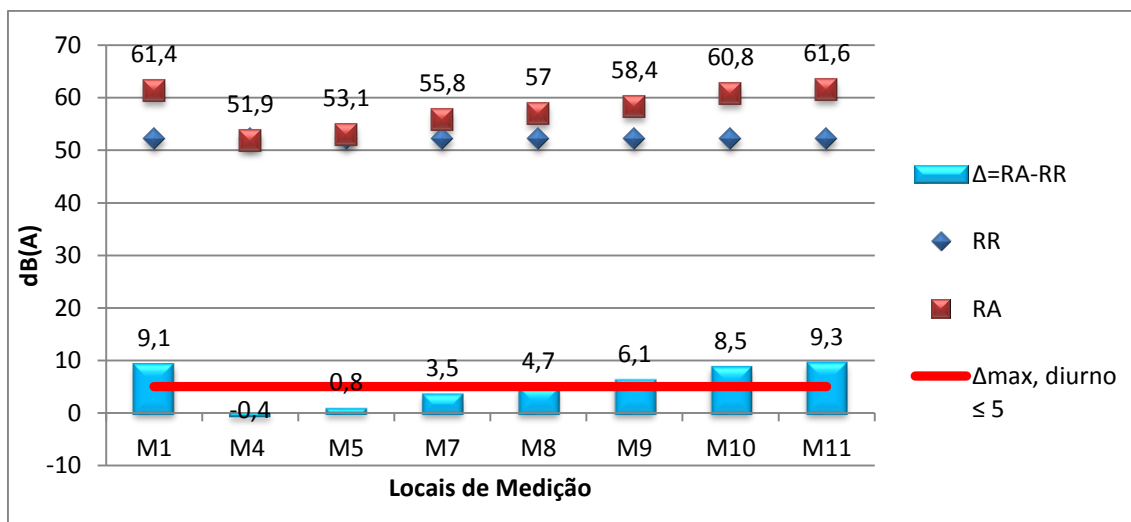


Fig. 106 - Níveis sonoros envolvidos na avaliação do critério de incomodidade (Mindelo).

Na Fig. 106 pode observar-se a representação dos valores de ruído ambiente (RA) e de ruído residual (RR), correspondente ao local de medição M6 e a diferença Δ entre o ruído ambiente e o ruído residual, assim como do respetivo valor legal máximo para o período diurno (Δ_{max}).

Pode verificar-se que apenas o local M4 e o local M5 cumprem o critério de incomodidade para o período de referência diurno.

De seguida na Fig. 107 apresenta-se uma representação gráfica da relação entre o nível sonoro de ruído ambiente e a velocidade de vento correspondentes aos vários pontos de medição analisados. Os pontos a azul (M6 e M3) referem-se a locais suficientemente afastados do aerogerador para não sofrerem influência do ruído emitido por este.

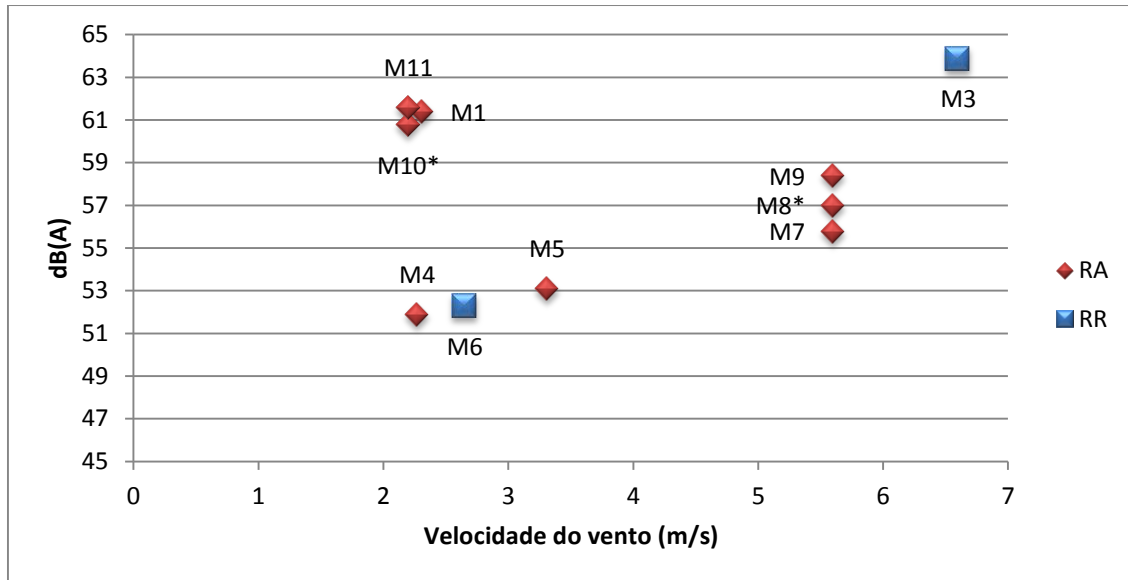


Fig. 107 – Nuvem de pontos mostrando como os níveis de ruído variam com a velocidade de vento usando os vários locais de medição analisados (Mindelo).

Verifica-se que, para locais com velocidades de vento superiores a 6 m/s e sem influência do aerogerador, como é exemplo o ponto M3, e com, aproximadamente, o mesmo tipo de influência de ruído marítimo do ponto M1 localizado a 8 m do aerogerador, o nível de ruído correspondente, 63,9 dB(A), supera o do local M1.

Relativamente aos pontos M7, M8* e M9, com velocidades de vento superiores a 5 m/s, também se denota uma redução significativa do nível de ruído medido (ruído ambiente incorporando o ruído do aerogerador) em relação ao local M3.

Na Fig. 108 pode observar-se a representação, em função da velocidade média do vento, dos valores de ruído ambiente (RA) e de ruído residual (RR), do valor do indicador L_{den} , dos limites legais do indicador L_n e L_{den} para zonas sensíveis (ZS) e para zonas mistas (ZM) e a diferença Δ entre o ruído ambiente e o ruído residual, assim como do respetivo valor legal máximo para o período diurno (Δ_{max}).

Relativamente ao critério de exposição verifica-se que o limite legal para o indicador L_{den} é excedido em Zonas Sensíveis e cumprido para Zonas Mistas, em todas as velocidades de vento indicadas.

Quanto ao critério de incomodidade este é cumprido para todas as velocidades analisadas no período diurno e em todos os períodos apenas para velocidades de vento de 3 m/s.

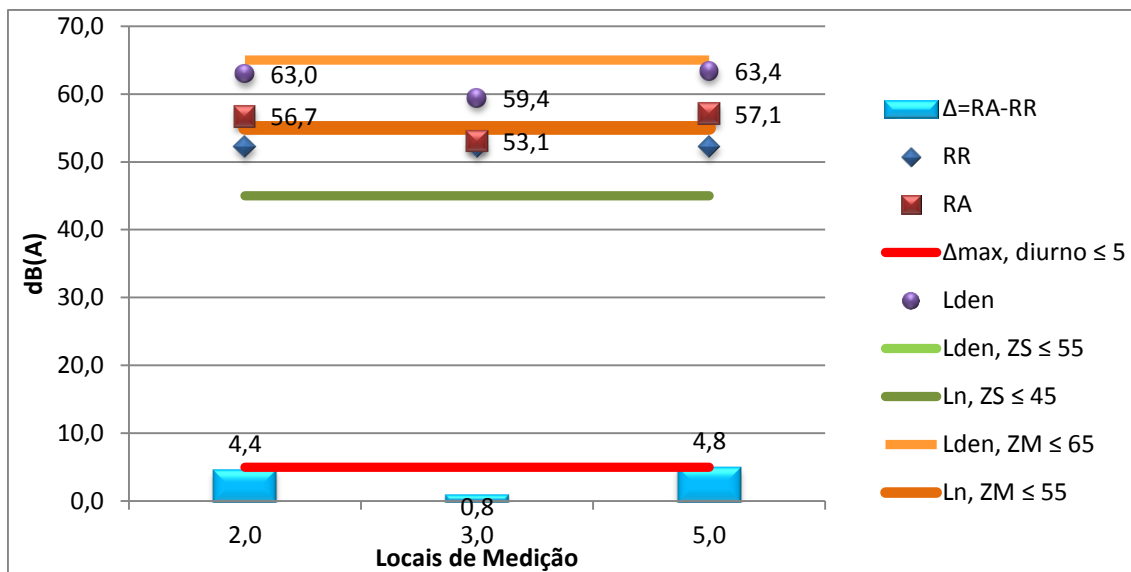


Fig. 108 - Níveis sonoros envolvidos na avaliação do critério de incomodidade (Mindelo).

6.4. ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

Neste subcapítulo apresenta-se a análise dos resultados obtidos, através da comparação dos diferentes casos de estudo.

Começa-se por comparar os dois casos de estudo práticos apresentados nesta dissertação, cujos valores de ruído se apresentam na Fig. 109. Relativamente ao caso de estudo 2 (Mindelo) foi selecionado o local de medição M1, uma vez que se situa a 8 m do aerogerador tal como o único local de medição correspondente ao caso prático 1 (Chaves). Apesar de os casos de estudo práticos apresentados corresponderem a dois aerogeradores de características diferentes, nomeadamente a sua potência nominal, altura do centro do rotor acima do solo e tipo de sistema de orientação os resultados podem ser comparáveis, uma vez que aerogeradores com características similares podem apresentar níveis de ruído diferentes devido às características próprias de cada aerogerador e do local onde estão localizados.

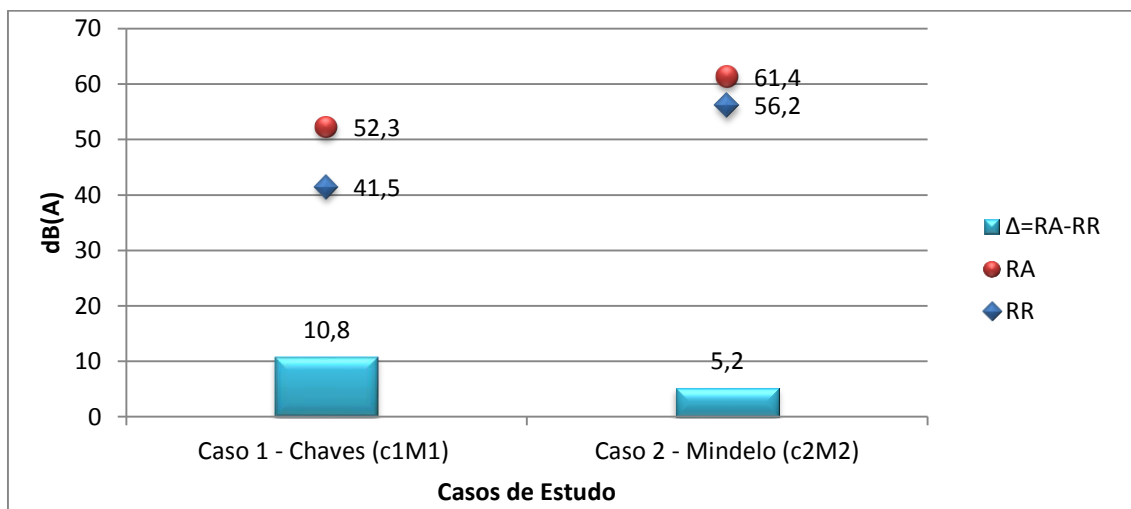


Fig. 109 – Níveis de ruído ambiente (RA) e residual (RR) relativo aos casos de estudo práticos.

Na Fig. 109 podem observar-se os valores de nível sonoro de ruído ambiente (RA), medidos a 8 m de distância de cada um dos aerogeradores, e de nível sonoro de ruído residual (RR) obtidos para o caso de estudo prático 1, no local de medição M1 (c1M1) e para o caso de estudo prático 2 no local de medição M1 (c2M1), bem como a diferença Δ entre o ruído ambiente e o ruído residual.

Pode observar-se que a diferença Δ no caso prático 1 (Chaves) é mais elevada do que no caso prático 2 (Mindelo), existindo um acréscimo de ruído maior, devido ao ruído emitido pelo aerogerador respetivo. Apesar de se localizarem à mesma distância dos aerogeradores respetivos, a velocidade de vento no caso prático 1 é de 6 m/s e no caso prático 2 de, aproximadamente, 2 m/s, o que leva a um aumento do ruído emitido pelo aerogerador mas também do ruído residual, o que não influenciaria o resultado de forma significativa, a esta distância dos aerogeradores. Contudo o aumento do ruído residual com o aumento da velocidade de vento não é necessariamente proporcional ao aumento do ruído emitido pelo aerogerador com o aumento da velocidade de vento.

Além disto o aerogerador c2 está montado numa torre de aproximadamente 10 m de altura, e o aerogerador c1 a 5 m de altura, o que poderá levar a velocidades de vento superiores aos valores registados pelo anemómetro, através do qual se mediu a velocidade de vento a, aproximadamente, 2 m de altura do solo. Como os aerogeradores se localizam em locais distintos o perfil de velocidades de vento poderá ser diferente para os dois locais e a velocidade de vento não aumentaria da mesma forma desde a altura do anemómetro à altura do centro do rotor dos aerogeradores.

Relativamente ao ruído ambiente total, este apresenta valores mais elevados no caso de estudo c2. Isto deve-se ao facto de o ruído residual em c2 ser também mais elevado, uma vez que se localiza em meio urbano e próximo da frente marítima e o caso de estudo c1 em meio rural, embora se tenha verificado que a velocidade de vento seja mais elevada neste último.

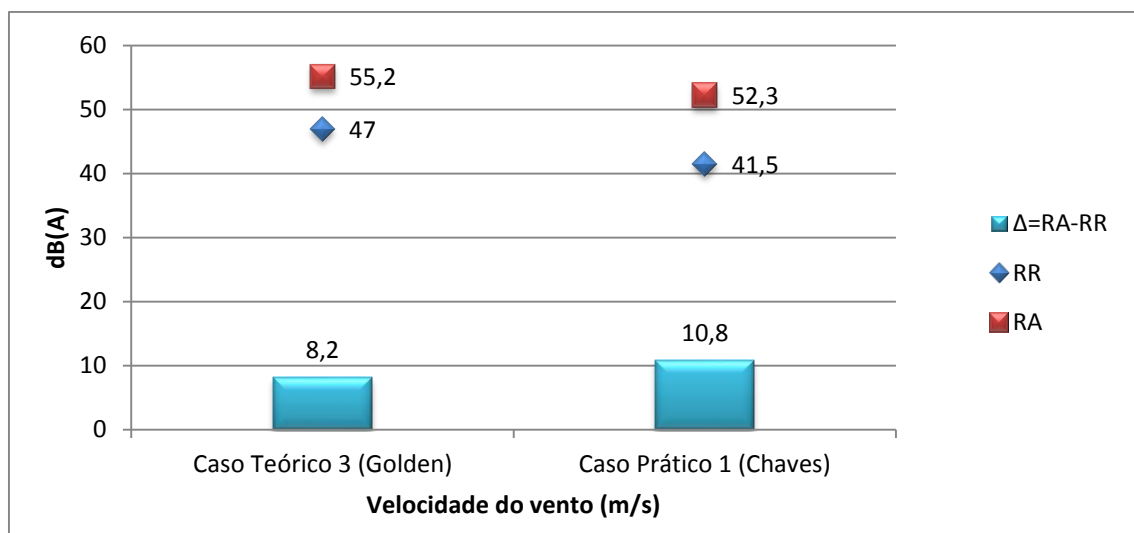


Fig. 110 - Níveis sonoros de ruído ambiente e residual relativo ao caso de estudo teórico 3 (Golden) e caso prático 1 (Chaves), para uma velocidade de vento de 6 m/s.

Compara-se agora o caso de estudo teórico 3 e caso de estudo prático 1, correspondentes a aerogeradores da família *Whisper*, cujas características técnicas são similares. Na Fig. 110 pode

observar-se a representação dos valores de nível sonoro ambiente (RA), e de nível sonoro residual (RR) obtidos a uma velocidade de vento de 6 m/s, para o caso de estudo prático 1 (c1M1), a 8 m de distância do aerogerador, e para o caso de estudo teórico 3, a 10 m do aerogerador *Whisper* H40, bem como a diferença Δ entre o ruído ambiente e o ruído residual.

O valor de ruído ambiente do caso teórico 3 é mais elevado do que no caso prático 1, o que se deve ao facto de o ruído residual já ser, por si só, mais elevado do que no caso prático 1.

Apesar de apresentarem características similares pode observar-se na Fig. 110 que a diferença Δ no caso de estudo prático 1 é maior em 2,6 dB(A) do que o caso de estudo teórico. Contudo neste caso deve ter-se em conta o decréscimo de nível sonoro com a distância à fonte, uma vez que no caso prático 1, o aerogerador se encontra 2 m mais próximo da base do aerogerador, o que resulta numa atenuação por divergência geométrica de: $\Delta = 20 \cdot \log(9,43/13,52) = -3,1$ dB(A), em relação ao nível sonoro do caso prático 1, considerando a fonte sonora como pontual. Considerando que o RA do caso prático a 10 m de distância do aerogerador sofria uma redução adicional $\Delta = -3,1$ dB(A), este tomaria o valor de 7,7 dB(A) e seria inferior ao valor de 8,2 dB(A) do caso de estudo teórico 3.

Outro aspeto a ter em conta é o facto de, no caso prático 1, a velocidade de vento ter sido medida através de um anemómetro colocado a, aproximadamente, 2 m de altura e no caso teórico 3 a 9,1 m de altura, o que pode resultar num valor de velocidade de vento para o caso prático 1 menor do que aquele que existiria à altura do rotor do aerogerador ou a 9,1 m de altura, o que resultaria na comparação com um valor de ruído mais elevado, tendo em conta que o nível de ruído aumenta com o aumento da velocidade de vento (ver Fig. 76).

Contudo aerogeradores com características similares podem apresentar diferentes acréscimos de ruído devido, por exemplo, a má manutenção do aerogerador ou diferenças no desenho das pás, que causam emissão de ruído com características diferentes.

De seguida é feita uma comparação geral entre os casos de estudo analisados, relativamente ao acréscimo de ruído causado pelos aerogeradores, a várias velocidades de vento, a fim de se perceber o que é possível fazer para que os casos de estudo analisados cumpram os critérios de exposição e incomodidade. Contudo é necessário ter em conta que os locais de medição de cada caso de estudo não se encontram à mesma distância do respetivo aerogerador em todos os casos apresentados, o que pode influenciar os resultados de acréscimo de ruído na Fig. 111.

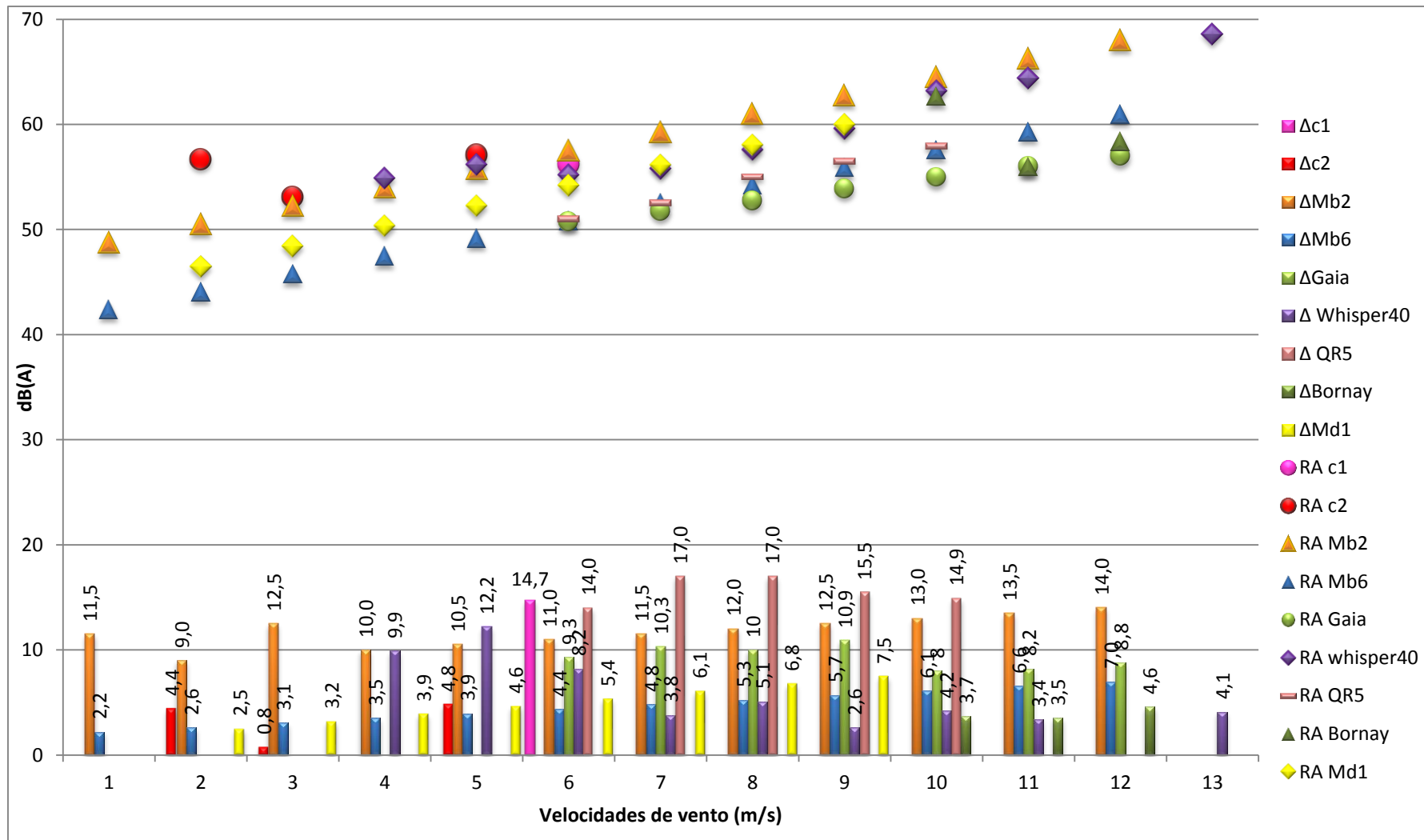


Fig. 111 – Nível de ruído ambiental (RA) e acréscimo de ruído (Δ) devido ao aerogerador para os vários casos de estudo em função da velocidade de vento nos locais de medição.

Na Fig. 111 podem observar-se os níveis sonoros de ruído ambiente (RA) para cada um dos casos de estudo e para diferentes velocidades de vento, bem como a diferença Δ entre o ruído ambiente corrigido da constante k_{tonal} e o respetivo ruído residual, que representa o acréscimo ao ruído residual que o ruído emitido por cada turbina provoca.

Verifica-se que os casos de estudo designados por “QR5” “Mb2” e “c1” são aqueles que sofrem um acréscimo de ruído, devido ao aerogerador, mais elevado na gama de velocidades analisadas, sendo o acréscimo de ruído mais significativo o correspondente ao caso de estudo QR5 com cerca de 17 dB(A), para uma velocidade de vento de 7 m/s.

Os casos de estudo “QR5”, “Mb2” e “c1” correspondem, respetivamente, a um aerogerador de 4,6 kW, a dois aerogeradores de 5 kW e a um aerogerador de, aproximadamente, 1 kW. Contudo, as distâncias dos locais de medição aos respetivos aerogeradores, em cada caso de estudo não são as mesmas, o que poderá influenciar os resultados. O local de medição do caso de estudo “QR5” encontra-se a 9,3 m do aerogerador respetivo e o local de medição de “c1” a 8 m, distâncias próximas e com os menores valores em todos os casos de estudo. O local de medição do caso Mb2, por sua vez encontra-se a 17 m e 14 m dos dois aerogeradores respetivos, o que levaria a um acréscimo de ruído maior se este se localizasse a distâncias menores dos dois aerogeradores.

O aerogerador “Gaia” apresenta uma potência nominal de 11 kW sendo a mais elevada neste estudo, seguida da potência combinada dos dois aerogeradores do caso de estudo “Mb6” que provocariam o dobro do ruído que um só aerogerador de 5 kW emitiria. Contudo, no caso “Gaia” o ponto de medição encontra-se a 24,7 m do aerogerador respetivo e, no caso “Mb6”, a 43 m e 40 m dos dois aerogeradores respetivos, o que faz com que estes acréscimos ao ruído residual sejam mais baixos do que os três casos primeiramente mencionados.

Em relação à incomodidade causada pelo acréscimo de ruído, verifica-se que o caso prático “c2” e o caso teórico “Bornay” seriam aqueles que provocariam menor incómodo. O ruído ambiente do caso prático 2 não apresenta características tonais ou impulsivas e este caso cumpriria o critério de incomodidade no período diurno. O mesmo acontece para o caso de estudo “Bornay”.

O caso de estudo “Mb6” apenas cumpre este critério em todos os períodos para velocidades de 1 e de 2 m/s. Contudo necessita de um decréscimo de no máximo 2 dB(A) para poder cumprir o critério de incomodidade no período diurno em todas as velocidades de vento e no período noturno na maioria das velocidades de vento analisadas, nomeadamente velocidades inferiores a 7 m/s. Este decréscimo poderia ser conseguido com o aumento da distância ao aerogerador. O local Mb6 encontra-se a 43 e 40 m dos dois aerogeradores correspondentes ao caso de estudo 5. Se este conjunto de distâncias aumentasse para 54,2 e 50,4 m, respetivamente, o critério de incomodidade durante o período diurnos seria cumprido em todas as velocidades de vento.

Analisando a possibilidade destes aerogeradores estudados se localizarem em Zona Mista e cumprirem o critério de exposição no período noturno, verifica-se que os níveis de ruído de todos os casos de estudo apresentados excedem o limite máximo de exposição $L_n = 55$ dB(A), para Zonas Mistas. O mesmo acontece no cumprimento do critério de incomodidade para o este período de referência.

De forma a perceber o que se poderia fazer para que os casos de estudo analisados passassem a cumprir estes dois critérios nas condições referidas, analisou-se a hipótese de atenuar os níveis de pressão sonora através do aumento da distância do aerogerador aos recetores sensíveis mais próximos.

No Quadro 19 apresentam-se as distâncias mínimas (d_f) a que se deveria colocar o aerogerador para cumprir os dois critérios, nos locais de medição de cada de estudo onde não são cumpridos estes critérios para Zonas Mistas e no período noturno e pode-se observar o decréscimo de nível sonoro necessário para cumprir o critério de exposição no período noturno em Zonas Mistas ($\Delta L_{\text{exposição}}$) e o critério de incomodidade no período noturno ($\Delta L_{\text{incomodidade}}$), os valores de ruído ambiente (RA) que se considerou corresponderem ao indicador L_n e a diferença entre o ruído ambiente corrigido e o ruído residual (Δ). Os valores de RA e Δ escolhidos para cada caso de estudo, correspondem à velocidade de vento com os valores de RA e Δ mais elevados do respetivo caso de estudo, com exceção dos casos “Bornay” e “c2”, que apresentam locais de medição com distâncias ao aerogerador diferentes. São ainda indicados os valores da potência nominal (P_o) e do nível de potência sonora (L_w) a uma velocidade de vento de 8 m/s, de cada aerogerador, bem como a distância dos locais de medição ao(s) respetivo(s) aerogerador(es) (d_i).

Os decréscimos necessários ΔL_e e ΔL_i foram calculados através da fórmula da atenuação por divergência geométrica, para fontes pontuais que se apresenta na expressão 10:

$$\Delta L = 20 \times \log_{10} \left(\frac{d_i}{d_f} \right) \quad (10)$$

Onde, ΔL designa o decréscimo do nível de pressão sonora por variação da distância em decibel (dB(A));
 d_i distância inicial do aerogerador ao local de medição;
 d_f a distância final mínima a que se deveria colocar o aerogerador.

Pode observar-se que os decréscimos de ruído necessários para cumprir ambos os critérios de avaliação estabelecidos pelo RGR, para o mesmo local de medição e para cada caso de estudo, diferem consideravelmente e, consequentemente a distância final de afastamento necessária.

Locais de medição relativos a aerogeradores com valores de potências sonora próximas e a distâncias, aproximadamente iguais do aerogerador, podem exigir decréscimos de nível de ruído em relação, por exemplo, à diferença entre o RA corrigido e o RR diferentes, devido ao facto de os locais de medição respetivos apresentarem velocidades de vento diferentes quando se realizaram as medições. O aumento do nível de ruído residual e do nível sonoro emitido pela turbina com o aumento da velocidade de vento não são diretamente proporcionais ao aumento da velocidade de vento, pelo que a diferença entre o RA corrigido e o RR também não o é, e consequentemente, esta diferença é diferente para distintas velocidades de vento.

Quadro 19 – Distâncias mínimas d_f necessárias ao cumprimento dos critérios de exposição e incomodidade.

Caso de estudo	P_o (kW)	$L_{w,8m/s}$ (dB(A))	$\Delta_{máx}$ (dB(A))	d_i (m)	$\Delta L_{incomodidade, n}$ (dB(A))	$d_{f, incomodidade}$ (m)	$RA_{máx}$ (dB(A))	$\Delta L_{exposição, n}$ (dB(A))	$d_{f, exposição}$ (m)
Gaia	11	88,1	10,9	25	7,9	61	57	2	31
P1	1,5		3,7	5	0,7	5	62,7	7,7	12
Bornay	P3	1,5	4,6	10	1,6	18	58,4	3,4	15
	P7	1,5	3,5	35	0,5	37	56	1	39
Whisper	0,9	84,9	12,2	10	9,2	30	68,6	13,6	49
QR5	4,6		17	9	14,0	47	57,9	2,9	13
Md1	2 x 0,6	2 x 89,5	7,5	13	4,5	22	60	5	23
Mb2	2 x 5	2 x 89	14	16	11,0	55	68	13	69
Mb6	2 x 5	2 x 89	7	42	4,0	66	61	6	83
Chaves	~0,9 a 1	~84,4	14,7	8	11,7	31	56,2	1,2	9
	M1	2,4	83,8	9,1	8	6,1	100	6,4	178
	M7	2,4	83,8	3,5	53	0,5	150	0,8	58
Mindelo	M9	2,4	83,8	6,1	58	3,1	150	3,4	86
	M11	2,4	83,8	9,3	8	6,3	100	6,6	17

Além disso a correção do RA varia consoante o local de medição, fazendo variar para cada caso o valor de RA corrigido e, conseqüentemente, a diferença entre este e o RR.

Dada a variedade de características próprias de cada aerogerador e do local onde se podem instalar é difícil ou mesmo impossível arranjar uma regra geral que imponha uma distância mínima do recetor sensível mais próximo a considerar para aerogeradores de pequena dimensão.

Nas medições efetuadas não foi possível comparar locais em que as condições de velocidade de vento, de ruído residual, de distâncias dos locais de medições ao rotor do aerogerador, ou mesmo em que os aerogeradores tivessem características semelhantes.

7

CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

7.1. CONCLUSÕES

O presente trabalho permitiu investigar e caracterizar o ruído provocado por aerogeradores de pequena dimensão com especificações técnicas diferentes, em locais com ruído ambiente diferenciado, bem como o seu potencial de incomodidade.

Atualmente apenas os aerogeradores de pequena dimensão ligados à REN e registados no portal “Renováveis na hora” são obrigados a cumprir os requisitos estabelecidos no RGR, não estando estabelecidas distâncias mínimas a respeitar na instalação de aerogeradores e, no caso de aerogeradores autónomos (não ligados à rede e destinados a autoconsumo), não existe sequer qualquer exigência de licenciamento prévio ou outro tipo de regra imposta.

Os resultados obtidos nas monitorizações realizadas permitem concluir que os acréscimos de níveis sonoros causados pelos aerogeradores excedem os limites legais correspondentes ao critério de incomodidade do RGR e, por conseguinte, este não é cumprido em nenhum dos casos de estudo para os indicadores analisados, o que poderá causar incómodo “legal” a pessoas que se encontrem próximas destes aerogeradores.

O critério de exposição também não é cumprido na maior parte das situações analisadas.

A identificação deste tipo de incomodidade sugere a necessidade de estabelecer regras em relação à instalação de qualquer tipo de aerogerador de pequena dimensão em locais próximos de recetores sensíveis, como:

- a obrigatoriedade da realização de uma estimativa de ruído, para o local da instalação, quando se pretende instalar um aerogerador de pequena dimensão, a fim de se verificar o cumprimento dos critérios constantes no RGR e antes de se proceder ao seu licenciamento;
- a obrigatoriedade da monitorização de ruído depois de instalado o aerogerador, a fim de se verificar que efetivamente os critérios impostos pelo RGR são cumpridos.

Estas campanhas de monitorização são muito importantes uma vez que os níveis de ruído variam em função das características específicas e das condições climáticas no local e o ruído causado pelo aerogerador pode aumentar devido ao envelhecimento das componentes mecânicas dos aerogeradores e a deficiências na manutenção do mesmo.

As medições de ruído deveriam ser efetuadas durante vários dias, em condições atmosféricas diversas, e durante os períodos de referência constantes no RGR, de forma a se poder obter

valores mais representativos dos indicadores L_d , L_e e L_n e, consequentemente aplicar de forma mais correta o critério de exposição do RGR.

Deveria ser efetuado um maior número de medições de ruído nos mesmos locais de medição em condições meteorológicas diferentes, nomeadamente, a velocidades de vento diferentes, de forma a se obter um conjunto mais vasto de resultados nos mesmos pontos de medição.

O ruído de aerogeradores instalados em zonas rurais, onde o ruído residual não é tão elevado como em zonas urbanas, poderá levar a uma emergência de ruído emitido pelo aerogerador mais acentuada e, consequentemente a uma maior manifestação de incomodidade, por exemplo, um dos aerogeradores ponderados como caso de estudo no concelho de Chaves, localiza-se em ambiente rural próximo da única habitação existente no local, onde o ruído residual é relativamente baixo e a emergência do ruído emitido pelo aerogerador seria maior do que, por exemplo, num dos aerogeradores localizados no concelho da Maia junto de uma via de trânsito com bastante tráfego, onde o ruído residual mais elevado mascara o ruído emitido pelo aerogerador.

Foi possível constatar a forma como algumas situações particulares de ruído podem influenciar os resultados, nomeadamente o ruído residual próprio do local. É o caso dos locais correspondentes aos casos de estudo práticos 1 e 2, onde o valor de ruído residual difere bastante e influencia o valor de ruído ambiente total.

Verificou-se, no caso de estudo prático 2, que a distância às fontes sonoras relevantes existentes, como o ruído marítimo pode influenciar o valor do ruído ambiente, mesmo para distâncias distintas da costa e que, em ambiente urbano a geometria dos edifícios pode também influenciar os valores medidos, na medida em que os edifícios existentes funcionam como obstáculos que podem atenuar o ruído emitido pelas várias fontes sonoras em determinados locais de medição. Tal facto ocorreu também no caso de estudo prático 2 onde locais de medição com características semelhantes, como os locais M7 e M9, apresentam valores distintos de ruído ambiente devido à atenuação do ruído marítimo pelos edifícios existentes próximos do local M7.

Por fim concluiu-se que os procedimentos formais de licenciamento de aerogeradores deveriam ser estendidos a todos os aerogeradores de pequena dimensão, mesmo para aqueles que não se encontram ligados à rede elétrica e que estes deveriam incluir a apresentação de uma “avaliação acústica” – conforme indicado no ponto 9 do artigo 13º do RGR - Atividades Ruidosas Permanentes, que, no mínimo englobará uma recolha de dados acústicos com a descrição detalhada da futura localização do aerogerador, uma estimativa do ruído causado pelo aerogerador e dos seus potenciais efeitos relativamente a recetores sensíveis existentes na proximidade.

Dados os resultados das medições realizadas, em situações que incluíam aerogeradores que foram objeto de licenciamento, considera-se que também será necessário instituir procedimentos regulares de monitorização – pós instalação do aerogerador, para verificação das estimativas da avaliação acústica e do efetivo cumprimento do RGR.

7.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Tendo em conta que a incomodidade é dependente da perceção humana, seria interessante a realização de questionários aos habitantes mais próximos, de forma a obter mais informação sobre o ruído percebido pelas pessoas, que vivem próximas de aerogeradores de pequena dimensão e relacionar esta informação com os resultados das medições de ruído.

Realização das medições dentro de edifícios e no interior de propriedades próximas de aerogeradores, e posterior comparação com os resultados de inquéritos realizados aos habitantes destas propriedades.

Realização de estudos de ruído relativamente a um maior número de aerogeradores com características técnicas diferentes de forma a obter uma imagem mais completa da natureza do ruído de aerogeradores de pequena dimensão e ainda aerogeradores com características técnicas semelhantes em locais com níveis de ruído ambiente preexistente diferentes. A velocidade de vento à altura do rotor deveria ser medida simultaneamente com as medições de ruído, de forma a melhor se poder comparar futuros casos de estudo práticos com os casos de estudo teóricos aqui abordados ou outros de natureza semelhante.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Comissão Europeia, “Renewable Energy,” [Online]. Available: http://ec.europa.eu/energy/renewables/index_en.htm. [Acedido em Novembro 2013].
- [2] E. Mollasalehi, Q. Sun e W. David, *Contribution of Small Wind Turbine Structural Vibration to Noise Emission*, vol. 6, Energies, 2013.
- [3] J. Taylor, *The Characteristics and Perception of Small Wind System Noise*, University of Nottingham, 2011.
- [4] T. D. Rossing, *Springer Handbook of Acoustics*, Stanford University, 2007.
- [5] F. A. Everest, *The Master Handbook of Acoustics*, New York: McGraw-Hill, 2001.
- [6] Programa Prof2000, “Audição,” [Online]. Available: <http://www.prof2000.pt/users/mrsd/8ano/Audicao.htm>. [Acedido em Janeiro 2014].
- [7] Brüel & Kjær, *Environmental Noise*, Nærum, 2000.
- [8] A. P. O. Carvalho, *Acústica Ambiental e de Edifícios*, vol. 8.3, Porto: FEUP, 2012.
- [9] ISO, International Organization for Standardization, *ISO 226:2003 - Acoustics: Normal equal loudness level contours*, Geneva: ISO, International Organization for Standardization.
- [10] MAOTDR, Ministério do Ambiente do Ordenamento do Território e do Desenvolvimento Regional, *Decreto-Lei n.º 251/1987 de 24 de Junho*, Lisboa: INCM, Imprensa Nacional Casa da Moeda, 2000.
- [11] CT28 (SPAcústica), *NP ISO 1996-1: Acústica - Descrição, medição e avaliação do ruído ambiente – Parte 1: Grandezas fundamentais e métodos de avaliação.*, Caparica: IPQ, Instituto Português da Qualidade, 2011.
- [12] MAOTDR, Ministério do Ambiente do Ordenamento do Território e do Desenvolvimento Regional, *Decreto-Lei n.º 9/2007 de 17 de Janeiro*, Vols. %1 de %2Diário da República – I Série- A Nº 12, Lisboa: INCM, Imprensa Nacional Casa da Moeda, 2007.
- [13] A. P. O. Carvalho e C. Rocha, *Manual Técnico para Elaboração de Planos Municipais de Redução de Ruído*, Amadora: APA, Agência Portuguesa do Ambiente, 2008.
- [14] Instituto do Ambiente, *O Ruído e a Cidade*, Lisboa: Instituto do Ambiente, 2004.
- [15] CT 28 (DGA), *NP 4361: Acústica - Atenuação do som na sua propagação ao ar livre*, IPQ, Instituto Português da Qualidade, 1997.
- [16] AEA, Agência Europeia do Ambiente, “Ambiente Urbano,” [Online]. Available: <http://www.eea.europa.eu/pt/themes/urban/intro>. [Acedido em Novembro 2013].
- [17] Comissão das Comunidades Europeias, *Futura Política de Ruído - Livro Verde da Comissão Europeia*, Bruxelas: Serviço das Publicações Oficiais das Comunidades Europeias, 1996.

- [18] OMS, Organização Mundial de Saúde, “Ruído - Dados e Estatísticas,” [Online]. Available: <http://www.euro.who.int/en/health-topics/environment-and-health/noise/data-and-statistics>. [Acedido em Janeiro 2014].
- [19] Comissão Europeia, *Relatório da Comissão ao Parlamento Europeu e ao Conselho relativo à aplicação da Diretiva Ruído Ambiente em conformidade com o artigo 11.º da diretiva 2002/49/CE*, Bruxelas, 2011.
- [20] Jornal Oficial das Comunidades Europeias, *Directiva 2002/49/CE do Parlamento Europeu e do Conselho de 18 de Julho de 2002*, 2002.
- [21] B. Valadas, M. Guedes e J. Coelho, *Ruído Ambiente em Portugal*, Amadora: Direcção Geral do Ambiente, 1996.
- [22] APA, Agência Portuguesa do Ambiente, *Relatório do Estado do Ambiente 2012*, Agência Portuguesa do Ambiente, I.P., 2012.
- [23] J. F. Manwell, J. G. McGowan e A. L. Rogers, *Wind Energy Explained: Theory, Design and Application*, Wiley, 2009.
- [24] T. Burton, D. Sharpe, N. Jenkins e E. Bossanyi, *Wind Energy Handbook*, Wiley, 2001.
- [25] WWEA, The World Wind Energy Association, “Wind Energy - Technology and Planning,” [Online]. Available: <http://wwindea.org/technology/ch01/estructura-en.htm>. [Acedido em Novembro 2013].
- [26] P. Kühn, *Introduction to Small Wind Turbines*, Kassel: IWES, Fraunhofer Institute for Wind Energy and Energy System Technology, 2010.
- [27] Carbon Trust, *Small-scale Wind Energy - Policy insights and practical guidance*, London: The Carbon Trust, 2008.
- [28] AEA, Agência Europeia do Ambiente, “Alterações climáticas,” [Online]. Available: <http://www.eea.europa.eu/pt/themes/climate/intro>. [Acedido em Novembro 2013].
- [29] REN21, Renewable Energy Policy Network for the 21st Century, *Renewables 2013 Global Status Report*, 2013.
- [30] Jornal Oficial da União Europeia, *Directiva 2009/28/CE do Parlamento Europeu e do Conselho de 23 de Abril de 2009*, 2009.
- [31] DGEG, Direcção Geral da Energia e Geologia, *Renováveis - Estatísticas Rápidas Novembro 2013*, 2013.
- [32] Presidência do Conselho De Ministros, *Resolução do Conselho de Ministros n.º 20/2013*, 2013.
- [33] MAOTE, Ministério do Ambiente, Ordenamento do Território e Energia, “Direcção Geral de Energia e Geologia,” [Online]. Available: <http://www.dgeg.pt/>. [Acedido em Dezembro 2013].
- [34] REN, Redes Energéticas Nacionais, *Dados Técnicos/Technical Data 2012*, Lisboa: REDES ENERGÉTICAS NACIONAIS SGPS, SA, 2013.

- [35] Deloitte, *Estudo do Impacto Macroeconómico do Sector das Energias Renováveis em Portugal*, Associação de Energias Renováveis, 2009.
- [36] WWEA, The World Wind Energy Association, *2013 Half-year Report*, 2013.
- [37] WWEA, World Wind Energy Association, *Small Wind World Report 2013*, Bonn, 2013.
- [38] WWEA, The European Wind Energy Association, *Annual Report 2012*, 2012.
- [39] REN, Redes Energéticas Nacionais, *A energia eólica em Portugal - 2012*, Lisboa: REDES ENERGÉTICAS NACIONAIS SGPS, SA, 2013.
- [40] IEA Wind, International Energy Agency, *IEA Wind 2012 Annual Report*, Boulder: PWT Communications, LLC, 2013.
- [41] INEGI, Instituto de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial; APREN, Associação de Energias Renováveis, *Parques Eólicos em Portugal*, e2p, Energias Endógenas de Portugal, 2012.
- [42] Ambiente Online, “Canal Ambiente,” [Online]. Available: <http://www.ambienteonline.pt/canal/detalhe/5851>. [Acedido em Novembro 2013].
- [43] MEE, Ministério da Economia e do Emprego, *Decreto-Lei n.º 215-A/2012 de 8 de Outubro*, Lisboa: INCM, Imprensa Nacional Casa da Moeda, 2012.
- [44] ME, Ministério da Economia, “ERSE, Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos - Eletricidade,” [Online]. Available: <http://www.erse.pt/pt/electricidade/Paginas/default.aspx>. [Acedido em Outubro 2013].
- [45] ME, Ministério da Economia, *Decreto-Lei n.º 68/2002 de 25 de Março*, Lisboa: INCM, Imprensa Nacional Casa da Moeda, 2002.
- [46] MEI, Ministério da Economia e da Inovação, *Decreto-Lei n.º 34/2011 de 8 de Março*, Lisboa: INCM, Imprensa Nacional Casa da Moeda, 2011.
- [47] MEI, Ministério da Economia e da Inovação, *Decreto-Lei 373/2007 de 6 de Novembro*, Lisboa: INCM, Imprensa Nacional Casa da Moeda, 2007.
- [48] MEE, Ministério da Economia e do Emprego, *Decreto-Lei 25/2013 de 19 de Fevereiro*, Lisboa: INCM, Imprensa Nacional Casa da Moeda, 2013.
- [49] APESF, Associação Portuguesa das Empresas do Sector Fotovoltaico, *Comunicado da APESF - Reunião com a DGEG a 14 de Janeiro de 2014*, Lisboa, 2014.
- [50] T. Simões, P. Costa e A. Estanqueiro, *A first methodology for wind energy resource assessment in urbanised areas in Portugal*, INETI, Instituto Nacional de Engenharia, Tecnologia e Inovação, I.P., 2009.
- [51] MEE, Ministério da Economia e do Emprego, “Renováveis na Hora,” [Online]. Available: <http://www.renovaveisnahaora.pt/web/srm/estatisticas1>. [Acedido em Janeiro 2014].
- [52] C. Beller, *Urban Wind Energy - State of the Art 2009*, Risø DTU National Laboratory for Sustainable Energy, 2009.

- [53] Wineur, Wind Energy Integration in the Urban Environment, *Urban Wind Turbines Technology review - A companion text to the Catalogue of European Urban Wind Turbine Manufacturers*, 2005.
- [54] S. Stankovic, N. Campbell e A. Harries, *Urban Wind Energy*, Earthscan, 2009.
- [55] C. P. e E. A. Miranda P., *Development and Validation of the Portuguese Wind Atlas*, Lisboa: INETI, Instituto Nacional de Engenharia, Tecnologia e Inovação; CGUL, Centro de Geofísica da Universidade de Lisboa, 2006.
- [56] Department of Wind Energy, Technical University of Denmark, “WAsP, Wind Atlas Analysis and Application Program,” [Online]. Available: <http://www.wasp.dk/>. [Acedido em Novembro 2013].
- [57] A. Estanqueiro e T. Simões, *Aproveitamento de Energia Eólica em Ambiente Urbano e Construído*, Porto: Renováveis magazine, 2010.
- [58] J. Layton, “How stuff works,” 9 Setembro 2006. [Online]. Available: <http://ambiente.hsw.uol.com.br/energia-eolica1.htm>. [Acedido em Novembro 2014].
- [59] P. Kühn, *Introduction to Small Wind Turbines*, Tarragona, Spain: Fraunhofer Institute for Wind Energy & Energy System Technology, 2010.
- [60] INETI, Instituto Nacional de Engenharia Tecnologia e Inovação, “T.Urban,” [Online]. Available: <http://turban.ineti.pt/entrada.htm>. [Acedido em Outubro 2013].
- [61] Portal Energia - Energias Renováveis, “Componentes e aplicacoes de um Sistema Micro-Eólico,” 2005. [Online]. Available: <http://www.portal-energia.com/componentes-e-aplicacoes-de-um-sistema-micro-eolico/>. [Acedido em Dezembro 2013].
- [62] Portal Energia - Energias Renováveis, “Ligação à rede de um sistema de micro-produção,” [Online]. Available: <http://www.portal-energia.com/sistemas-de-ligacao-a-rede/>. [Acedido em Dezembro 2013].
- [63] Portal Energia - Energias Renováveis, “Sistema de microgeração,” [Online]. Available: <http://www.portal-energia.com/como-e-composto-um-sistema-de-microgeracao/>. [Acedido em Dezembro 2013].
- [64] J. C. Kirchner, *Acoustic Emission Characterization of Six Wind Turbines: A Diagnostic Tool to Isolate, Identify, and Quantify Point Source Contributors to a Wind Turbine's Noise*, Boone: Appalachian State University, 2012.
- [65] A. L. Rogers, J. F. Manwell e S. Wright, *Wind Turbine Acoustic Noise*, Amherst: University of Massachusetts, 2006.
- [66] E. Pedersen e K. P. Waye, *Perception and annoyance due to wind turbine noise - A dose-response relationship*, Acoustical Society of America, 2004, p. 3460–3470.
- [67] R. C. Ramachandran, H. Patel e G. Raman, *Localization of Wind Turbine Noise Sources Using a Compact microphone array with advanced beamforming algorithms*, 2012.
- [68] E. V. F. Hodgson, *Residential Wind Turbines and Noise Emissions*, 2007.

- [69] S. Broneske, *Approach to assessing noise from smaller scale wind turbines*, Salisbury & Machynlleth: Hayes McKenzie Partnership Ltd, 2012.
- [70] D. H. Wood, *Noise Measurement and Prediction for Small Wind Turbines*, Camberra: Solar '97 - Australian and New Zealand Solar Energy Society, 1997.
- [71] P. Asmus, K. Fullerton, S. Peterson, H. Rhoads-Weaver, A. Shutak e S. S. Schwartz, *Permitting Small Wind Turbines: A Handbook*, California Energy Commission, 2003.
- [72] Governo de Ontário, “Renewable Energy Approvals,” [Online]. Available: <http://www.ontario.ca/environment-and-energy/renewable-energy-approvals>. [Acedido em Janeiro 2014].
- [73] Ministry of the Environment and Climate Change - Ontario, *Technical Guide to Renewable Energy Approvals*, Ontario: Queen’s Printer for Ontario, 2013.
- [74] The Secretary of State, United Kingdom, *The Town and Country Planning (General Permitted Development) (Amendment and Consequential Provisions) (England) Order 2014*, The Stationery Office, 2014.
- [75] Government of the United Kingdom, “Planning Portal,” [Online]. Available: <http://www.planningportal.gov.uk/permission/commonprojects/windturbines>. [Acedido em Janeiro 2014].
- [76] Department of Energy and Climate Change, “The Microgeneration Certification Scheme,” [Online]. Available: <http://www.microgenerationcertification.org/consumers/planning-information>. [Acedido em 2014].
- [77] Microgeneration Certification Scheme, *MCS 020 - MCS Planning Standards For permitted development installations of wind turbines and air source heat pumps on domestic premises*, London: Department of Energy and Climate Change, 2008.
- [78] J. Cace, *Wind Energy Integration in the Urban Environment: Administrative and Planning Issues - Netherlands*, Wineur, Wind Energy Integration in the Urban Environment, 2006.
- [79] Onze Minister van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer, Nederland, *Besluit voorzieningen en installaties milieubeheer*, 2001.
- [80] IEC, International Electrotechnical Commission, *IEC 61400-11: Wind turbine generator systems - Part 11: Acoustic noise measurement techniques Second edition 2002-12*, Geneva: International Electrotechnical Commission.
- [81] K. Syngellakis, P. Clement e J. Cace, *Administrative and Planning Issues for Small Wind Turbines in Urban Areas*, Chichester: Wineur, Wind Energy Integration in the Urban Environment, 2006.
- [82] A. Huskey, *Wind Turbine Generator System Acoustic Noise Test Report for the Gaia Wind 11 kW Wind Turbine*, NREL, National Renewable Energy Laboratory, 2011.
- [83] P. Zuliani, *Experimental Test Site for Small Wind Turbines of Narbonne*, Narbonne: SEPEN, Experimental Site for National Small Wind, 2005.

- [84] NREL, National Renewable Energy Laboratory, *Wind Turbine Generator System Acoustic Noise Test Report for the Whisper H40 Wind Turbine*, Golden: NREL, National Renewable Energy Laboratory, 2001.
- [85] A. L. Rogers, J. F. Manwell e S. Wright, *Wind Turbine Acoustic Noise*, Amherst: University of Massachusetts, 2006.
- [86] Quiet Revolution, *Quiet Revolution Noise Statement qr5 wind turbine*, London, 2008.
- [87] Quiet Revolution, “Quiet Revolution - Turbine Details,” [Online]. Available: <http://www.quietrevolution.com/qr5/qr5-turbine.htm>. [Acedido em Abril 2014].
- [88] CT28 (SPAcústica), *NP ISO 1996-2: Acústica - Descrição, medição e avaliação do ruído ambiente - Parte 2: Determinação dos níveis de pressão sonora do ruído ambiente*, Caparica: IPQ, Instituto Português da Qualidade, 2011.
- [89] Southwest Windpower, *Whisper Turbines Technical Specifications*, Flagstaff: Southwest Windpower, Inc., 2005.
- [90] XZERES Wind, “XZERES Wind - Skystream 3.7,” [Online]. Available: <http://www.windenergy.com/products/skystream/skystream-3.7>. [Acedido em Junho 2014].
- [91] “World Weather Online,” [Online]. Available: <http://www.worldweatheronline.com/>. [Acedido em Junho 2014].
- [92] Wikipédia, “Smock mill,” [Online]. Available: http://en.wikipedia.org/wiki/Smock_mill. [Acedido em Novembro 2013].

ANEXO A1

DADOS DAS MEDIÇÕES EFETUADAS RELATIVOS AOS LOCAIS DE MEDIÇÃO DO CASO DE ESTUDO PRÁTICO 1

LOCAL DE MEDIÇÃO M1

6
 @25 -----
 Brüel & Kjær
 Analizador Modular 2260
 Programa de Análisis Sonoro BZ7210

@25 Fichero :0001,S3B

Configuración:

 Rango 30,0 - 110,0 dB
 Incidencia Sonora Frontal
 Picos Sobre 140,0 dB

Resultados Globales:

 Fecha de Inicio 2014 May 24
 Hora de Inicio 17:32:37
 Fecha de Paro 2014 May 24
 Hora de Paro 17:47:53
 Tiempo Transcurrido 00:15:16
 Número de Pausas 0
 Saturación 0,0 %
 Subgama 0,0 %

Número de Picos (A) 0
 Número de Picos (L) 0

@25 Pond, Frecuencial: A L
 dB dB

 Lpk(PM x) 74,6 104,3
 Leq 56,2 86,3
 LEP,d(8:00) 56,2
 LE(SEL) 68,3
 LIm 57,4 90,6

Pond, Temporal: S F I
 dB dB dB

 LAM x 58,4 61,3 64,2
 LAMjn 54,7 53,6 54,0
 LATm3 56,8 58,0 59,7
 LATm5 57,3 58,7 60,7

LLM x 93,7 98,2 100,2
 LLMjn 79,2 71,8 83,2
 LLTm3 86,4 90,3 93,1
 LLTm5 87,5 91,4 94,0

dB

 LLeq-LAeq 30,1
 LAIm-LAeq 1,2

LAF1,0 59,8
 LAF5,0 58,6
 LAF50,0 55,6
 LAF95,0 54,2
 LAF99,0 53,6

6
 @25 -----
 Brüel & Kjær
 Analizador Modular 2260
 Programa de Análisis Sonoro
 BZ7210

@25 Fichero :0001,S3B

Configuración:

 Rango 30,0 - 110,0 dB
 Incidencia Sonora Frontal

Espectro en 1/3-octava:

 2014 May 24 17:32:37
 Tiempo Transcurrido 00:15:16
 Número de Pausas 0
 Saturación 0,00%
 Subgama 0,00%

@25 LLeq
 Hz dB

 12,5 77,4
 16 76,5
 20 76
 25 74
 31,5 72,4
 40 70,8
 50 69,4
 63 66,6
 80 62,5
 100 59,6
 125 56,2
 160 51,1
 200 46,7
 250 44
 315 42,1
 400 40,3
 500 39,8
 630 39,2
 800 39,7
 1k 41,3
 1,25k 42,2
 1,6k 41,3
 2k 40,9
 2,5k 41,9
 3,15k 43,4
 4k 43,7
 5k 45,1
 6,3k 47,3
 8k 48,3
 10k 47,6
 12,5k 44,2
 16k 35,4
 20k 32,1

Banda Ancha dB

 A 56,2
 L 86,3

LOCAL DE MEDIÇÃO M2

6

@25 -----
 Brüel & Kjær
 Analizador Modular 2260
 Programa de Análisis Sonoro BZ7210

@25 Fichero :0014,S3B

Configuración:

 Rango 10,0 - 90,0 dB
 Incidencia Sonora Frontal
 Picos Sobre 140,0 dB

Resultados Globales:

 Fecha de Inicio 2014 May 24
 Hora de Inicio 18:40:04
 Fecha de Paro 2014 May 24
 Hora de Paro 18:50:07
 Tiempo Transcurrido 00:10:03
 Número de Pausas 0
 Saturación 0,0 %
 Subgama 0,0 %

Número de Picos (A) 0
 Número de Picos (L) 0

@25 Pond, Frecuencial: A L
 dB dB

 Lpk(PM x) 55,8 82,8
 Leq 41,5 68,8
 LEP,d(8:00) 41,5
 LE(SEL) 46,0
 LIm 41,7 77,5

Pond, Temporal: S F I
 dB dB dB

 LAM x 42,2 44,2 45,1
 LAM;n 39,7 38,9 39,3
 LATm3 42,2 44,2 45,1
 LATm5

LLM x 72,7 76,3 80,6
 LLM;n 65,5 55,3 73,0
 LLTm3 72,7 76,3 80,6
 LLTm5

dB

 LLeq-LAeq 27,3
 LAIm-LAeq 0,2

LAF1,0 44,0
 LAF5,0 43,8
 LAF50,0 41,2
 LAF95,0 39,2
 LAF99,0 39,2

6

@25 -----
 Brüel & Kjær
 Analizador Modular 2260
 Programa de Análisis Sonoro BZ7210

@25 Fichero :0014,S3B

Configuración:

 Rango 10,0 - 90,0 dB
 Incidencia Sonora Frontal

Espectro en 1/3-octava:

 2014 May 24 18:40:04
 Tiempo Transcurrido 00:10:03
 Número de Pausas 0
 Saturación 0,00%
 Subgama 0,00%

@25 LLeq
 Hz dB

 12,5 56,3
 16 57,9
 20 56,7
 25 54,6
 31,5 49,3
 40 49,2
 50 42,4
 63 41,7
 80 34,3
 100 33,5
 125 30,8
 160 29,4
 200 29,4
 250 27,7
 315 27,9
 400 27,5
 500 28,1
 630 28,1
 800 30,3
 1k 32,3
 1,25k 33,7
 1,6k 30,8
 2k 29,6
 2,5k 30,2
 3,15k 28,3
 4k 28,1
 5k 26,2
 6,3k 24,3
 8k 21,5
 10k 16,7
 12,5k 14,5
 16k 12,7
 20k 11,3

Banda Ancha dB

 A 41,5
 L 68,8

ANEXO A2

DADOS DAS MEDIÇÕES EFETUADAS RELATIVOS AOS LOCAIS DE MEDIÇÃO DO CASO DE ESTUDO PRÁTICO 2

LOCAL DE MEDIÇÃO M1, M2, M3, M4, M5, M6, M4, M5, M6, M7, M8 E M9.

M1

6

@25 -----
 Brüel & Kjær
 Analizador Modular 2260
 Programa de Análisis Sonoro BZ7210

@25 Fichero :0001,S3B

Configuración:

 Rango 20,0 - 100,0 dB
 Incidencia Sonora Frontal
 Picos Sobre 140,0 dB

Resultados Globales:

 Fecha de Inicio 2014 May 31
 Hora de Inicio 15:35:28
 Fecha de Paro 2014 May 31
 Hora de Paro 15:46:23
 Tiempo Transcurrido 00:10:00
 Número de Pausas 2
 Saturación 0,0 %
 Subgama 0,0 %

Número de Picos (A) 0
 Número de Picos (L) 0

@25 Pond, Frecuencial: A L
 dB

dB

 Lpk(PM x) 84,4 103,0
 Leq 61,4 88,8
 LEP,d(8:00) 61,4
 LE(SEL) 86,7
 LIm 63,3 94,6

Pond, Temporal: S F I
 dB dB dB

 LAM x 67,5 69,9 71,4
 LAMjn 56,9 56,0 56,5
 LATm3 62,4 64,3 65,9
 LATm5 62,8 64,9 66,6

LLM x 95,7 99,7 101,6
 LLMjn 73,3 66,0 78,6
 LLTm3 91,1 94,9 97,7
 LLTm5 91,7 95,7 98,5

dB

 LLeq-LAeq 27,4
 LAIm-LAeq 1,8

LAF1,0 66,8
 LAF5,0 64,2
 LAF50,0 60,8
 LAF95,0 57,6
 LAF99,0 56,8

6

@25 -----

Brüel & Kjær
 Analizador Modular 2260
 Programa de Análisis Sonoro BZ7210

@25 Fichero :0001,S3B

Configuración:

 Rango 20,0 - 100,0 dB
 Incidencia Sonora Frontal

Espectro en 1/3-octava:

 2014 May 31 15:35:28
 Tiempo Transcurrido 00:10:00
 Número de Pausas 2
 Saturación 0,0 %
 Subgama 0,0 %

@25 LLeq

Hz	dB
12,5	80,1
16	79,2
20	78,0
25	76,9
31,5	75,6
40	74,2
50	72,4
63	70,2
80	67,1
100	63,7
125	60,7
160	57,4
200	54,8
250	53,8
315	52,7
400	52,4
500	53,1
630	55,2
800	51,9
1k	51,4
1,25k	52,0
1,6k	48,7
2k	47,2
2,5k	45,9
3,15k	45,0
4k	43,6
5k	41,0
6,3k	37,7
8k	34,6
10k	31,5
12,5k	28,5
16k	25,1
20k	---

Banda Ancha dB

 A 61,4
 L 88,8

M2

6

@25 -----
 Brüel & Kjær
 Analizador Modular 2260
 Programa de Análisis Sonoro BZ7210

@25 Fichero :0002,S3B

Configuración:

 Rango 20,0 - 100,0 dB
 Incidencia Sonora Frontal
 Picos Sobre 140,0 dB

Resultados Globales:

 Fecha de Inicio 2014 May 31
 Hora de Inicio 15:50:11
 Fecha de Paro 2014 May 31
 Hora de Paro 15:57:28
 Tiempo Transcurrido 00:05:01
 Número de Pausas 2
 Saturación 0,0 %
 Subgama 0,0 %

Número de Picos (A) 0
 Número de Picos (L) 0

@25 Pond, Frecuencial: A L
 dB dB

 Lpk(PM x) 86,7 103,0
 Leq 61,8 89,1
 LEP,d(8:00) 61,8
 LE(SEL) 89,6
 Llm 63,8 94,7

Pond, Temporal: S F I
 dB dB dB

 LAM x 69,5 73,8 76,1
 LAMjn 56,9 56,0 56,5
 LATm3 62,9 64,9 66,7
 LATm5 63,3 65,5 67,4

LLM x 95,8 100,3 101,9
 LLMjn 73,3 66,0 78,6
 LLTm3 91,4 95,0 97,8
 LLTm5 91,9 95,8 98,5

dB

 LLeq-LAeq 27,3
 LAIm-LAeq 2,0

LAF1,0 67,0
 LAF5,0 64,4
 LAF50,0 61,2
 LAF95,0 58,2
 LAF99,0 57,0

6

@25 -----

Brüel & Kjær
 Analizador Modular 2260
 Programa de Análisis Sonoro BZ7210

@25 Fichero :0002,S3B

Configuración:

 Rango 20,0 - 100,0 dB
 Incidencia Sonora Frontal

Espectro en 1/3-octava:

 2014 May 31 15:50:11
 Tiempo Transcurrido 00:05:01
 Número de Pausas 2
 Saturación 0,0 %
 Subgama 0,0 %

@25 LLeq

Hz	dB
12,5	80,2
16	79,4
20	78,5
25	77,6
31,5	76,2
40	74,9
50	73,1
63	70,9
80	67,8
100	64,4
125	61,3
160	57,9
200	55,3
250	54,3
315	53,2
400	53,0
500	54,1
630	56,1
800	51,9
1k	51,2
1,25k	51,8
1,6k	48,7
2k	47,4
2,5k	46,4
3,15k	45,5
4k	44,1
5k	41,7
6,3k	38,4
8k	35,5
10k	32,5
12,5k	29,6
16k	26,4
20k	21,5

Banda Ancha dB

 A 61,8
 L 89,1

M3

6

@25 -----
 Brüel & Kjær
 Analizador Modular 2260
 Programa de Análisis Sonoro BZ7210

@25 Fichero :0003,S3B

Configuración:

 Rango 10,0 - 90,0 dB
 Incidencia Sonora Frontal
 Picos Sobre 140,0 dB

Resultados Globales:

 Fecha de Inicio 2014 May 31
 Hora de Inicio 16:14:05
 Fecha de Paro 2014 May 31
 Hora de Paro 16:19:18
 Tiempo Transcurrido 00:03:00
 Número de Pausas 1
 Saturación 0,0 %
 Subgama 0,0 %

Número de Picos (A) 0
 Número de Picos (L) 0

@25 Pond, Frecuencial: A L
 dB dB

 Lpk(PM x) 93,0 93,0
 Leq 63,9 88,5
 LEP,d(8:00) 63,9
 LE(SEL) 85,0
 Llm 68,8 90,7

Pond, Temporal: S F I
 dB dB dB

 LAM x 72,1 78,8 83,0
 LAMjn 55,3 53,9 55,3
 LATm3 65,7 69,0 72,2
 LATm5 66,8 70,6 73,7

LLM x 90,7 92,0 92,5
 LLMjn 84,2 78,2 86,4
 LLTm3 89,5 91,0 92,1
 LLTm5 89,8 91,3 92,2

dB

 LLeq-LAeq 24,6
 LAIm-LAeq 4,9

LAF1,0 71,6
 LAF5,0 68,8
 LAF50,0 61,0
 LAF95,0 55,8
 LAF99,0 55,2

6

@25 -----

Brüel & Kjær
 Analizador Modular 2260
 Programa de Análisis Sonoro BZ7210

@25 Fichero :0003,S3B

Configuración:

 Rango 10,0 - 90,0 dB
 Incidencia Sonora Frontal

Espectro en 1/3-octava:

 2014 May 31 16:14:05
 Tiempo Transcurrido 00:03:00
 Número de Pausas 1
 Saturación 0,0 %
 Subgama 0,0 %

@25 LLeq

Hz	dB
12,5	79,6
16	78,8
20	78,5
25	76,8
31,5	75,6
40	74,4
50	72,8
63	71,4
80	69,4
100	66,7
125	64,0
160	61,2
200	58,4
250	56,2
315	54,3
400	53,2
500	53,6
630	54,6
800	53,6
1k	52,4
1,25k	52,2
1,6k	49,9
2k	48,0
2,5k	47,5
3,15k	46,7
4k	45,6
5k	42,8
6,3k	38,5
8k	35,0
10k	30,8
12,5k	26,4
16k	21,4
20k	16,2

Banda Ancha dB

 A 63,9
 L 88,5

M4

6

@25 -----
 Brüel & Kjær
 Analizador Modular 2260
 Programa de Análisis Sonoro BZ7210

@25 Fichero :0004,S3B

Configuración:

 Rango 10,0 - 90,0 dB
 Incidencia Sonora Frontal
 Picos Sobre 140,0 dB

Resultados Globales:

 Fecha de Inicio 2014 May 31
 Hora de Inicio 16:44:15
 Fecha de Paro 2014 May 31
 Hora de Paro 16:55:48
 Tiempo Transcurrido 00:10:01
 Número de Pausas 2
 Saturación 0,0 %
 Subgama 0,0 %

Número de Picos (A) 0
 Número de Picos (L) 0

@25 Pond, Frecuencial: A L
 dB dB

 Lpk(PM x) 70,7 93,0
 Leq 51,9 77,0
 LEP,d(8:00) 51,9
 LE(SEL) 73,9
 Lim 54,1 82,4

Pond, Temporal: S F I
 dB dB dB

 LAM x 56,6 57,6 68,5
 LAMjn 15,4 15,0 15,2
 LATm3 52,6 53,3 56,5
 LATm5 52,7 53,6 57,7

LLM x 86,4 90,3 92,0
 LLMjn 17,2 16,9 17,0
 LLTm3 79,7 83,0 85,5
 LLTm5 80,8 84,1 86,4

dB

 LLeq-LAeq 25,1
 LAIm-LAeq 2,2

LAF1,0 56,8
 LAF5,0 55,6
 LAF50,0 52,6
 LAF95,0 15,4
 LAF99,0 15,2

6

@25 -----

Brüel & Kjær
 Analizador Modular 2260
 Programa de Análisis Sonoro BZ7210

@25 Fichero :0004,S3B

Configuración:

 Rango 10,0 - 90,0 dB
 Incidencia Sonora Frontal

Espectro en 1/3-octava:

 2014 May 31 16:44:15
 Tiempo Transcurrido 00:10:01
 Número de Pausas 2
 Saturación 0,0 %
 Subgama 0,0 %

@25 LLeq

Hz	dB
12,5	67,3
16	66,8
20	65,4
25	64,2
31,5	61,7
40	59,7
50	56,2
63	53,3
80	51,0
100	48,7
125	47,2
160	46,4
200	46,6
250	45,0
315	44,7
400	44,6
500	43,9
630	45,1
800	44,2
1k	42,4
1,25k	40,9
1,6k	39,3
2k	38,0
2,5k	37,0
3,15k	36,4
4k	36,3
5k	32,0
6,3k	25,7
8k	20,6
10k	15,2
12,5k	---
16k	---
20k	---

Banda Ancha dB

 A 51,9
 L 77,0

M5

6

@25 -----
 Brüel & Kjær
 Analizador Modular 2260
 Programa de Análisis Sonoro BZ7210

@25 Fichero :0005,S3B

Configuración:

 Rango 10,0 - 90,0 dB
 Incidencia Sonora Frontal
 Picos Sobre 140,0 dB

Resultados Globales:

 Fecha de Inicio 2014 May 31
 Hora de Inicio 17:11:29
 Fecha de Paro 2014 May 31
 Hora de Paro 17:25:17
 Tiempo Transcurrido 00:10:00
 Número de Pausas 3
 Saturación 0,0 %
 Subgama 0,0 %

Número de Picos (A) 0
 Número de Picos (L) 0

@25 Pond, Frecuencial: A L
 dB dB

 Lpk(PM x) 75,9 93,0
 Leq 53,1 81,4
 LEP,d(8:00) 53,1
 LE(SEL) 77,9
 LIm 55,0 86,1

Pond, Temporal: S F I
 dB dB dB

 LAM x 58,0 62,0 68,5
 LAMjn 15,4 15,0 15,2
 LATm3 54,0 55,3 57,5
 LATm5 54,3 55,9 58,4

LLM x 88,7 91,2 92,4
 LLMjn 17,2 16,9 17,0
 LLTm3 83,6 86,6 88,8
 LLTm5 84,4 87,7 89,6

dB

 LLeq-LAeq 28,2
 LAIm-LAeq 1,8

LAF1,0 57,2
 LAF5,0 56,0
 LAF50,0 53,2
 LAF95,0 15,4
 LAF99,0 15,2

6

@25 -----

Brüel & Kjær
 Analizador Modular 2260
 Programa de Análisis Sonoro BZ7210

@25 Fichero :0005,S3B

Configuración:

 Rango 10,0 - 90,0 dB
 Incidencia Sonora Frontal

Espectro en 1/3-octava:

 2014 May 31 17:11:29
 Tiempo Transcurrido 00:10:00
 Número de Pausas 3
 Saturación 0,0 %
 Subgama 0,0 %

@25 LLeq

Hz	dB
12,5	72,8
16	71,8
20	70,0
25	68,4
31,5	66,7
40	64,8
50	62,1
63	59,1
80	56,6
100	53,8
125	51,2
160	49,2
200	48,5
250	46,7
315	45,7
400	45,5
500	44,9
630	46,0
800	44,9
1k	43,4
1,25k	42,0
1,6k	40,4
2k	39,1
2,5k	37,9
3,15k	37,1
4k	36,3
5k	32,4
6,3k	27,0
8k	22,4
10k	17,0
12,5k	10,4
16k	---
20k	---

Banda Ancha dB

 A 53,1
 L 81,4

M6

6

@25 -----
 Brüel & Kjær
 Analizador Modular 2260
 Programa de Análisis Sonoro BZ7210

@25 Fichero :0006,S3B

Configuración:

 Rango 10,0 - 90,0 dB
 Incidencia Sonora Frontal
 Picos Sobre 140,0 dB

Resultados Globales:

 Fecha de Inicio 2014 May 31
 Hora de Inicio 17:33:30
 Fecha de Paro 2014 May 31
 Hora de Paro 17:40:38
 Tiempo Transcurrido 00:05:36
 Número de Pausas 1
 Saturación 0,0 %
 Subgama 0,0 %

Número de Picos (A) 0
 Número de Picos (L) 0

@25 Pond, Frecuencial: A L
 dB dB

 Lpk(PM x) 79,1 93,0
 Leq 52,3 80,5
 LEP,d(8:00) 52,3
 LE(SEL) 74,8
 LIm 54,1 84,0

Pond, Temporal: S F I
 dB dB dB

 LAM x 62,5 65,9 69,5
 LAMjn 15,4 15,2 15,2
 LATm3 53,6 55,6 57,6
 LATm5 53,1 54,7 56,1

LLM x 89,8 91,9 92,5
 LLMjn 17,1 16,8 16,9
 LLTm3 81,9 84,3 85,8
 LLTm5 81,4 83,5 85,0

dB

 LLeq-LAeq 28,2
 LAIm-LAeq 1,8

LAF1,0 62,0
 LAF5,0 59,4
 LAF50,0 15,6
 LAF95,0 15,2
 LAF99,0 15,2

6

@25 -----

Brüel & Kjær
 Analizador Modular 2260
 Programa de Análisis Sonoro BZ7210

@25 Fichero :0006,S3B

Configuración:

 Rango 10,0 - 90,0 dB
 Incidencia Sonora Frontal

Espectro en 1/3-octava:

 2014 May 31 17:33:30
 Tiempo Transcurrido 00:05:36
 Número de Pausas 1
 Saturación 0,0 %
 Subgama 0,0 %

@25 LLeq

Hz	dB
12,5	71,4
16	70,3
20	69,3
25	67,6
31,5	66,6
40	64,6
50	63,4
63	60,5
80	58,0
100	55,2
125	52,4
160	49,8
200	47,7
250	46,1
315	45,0
400	44,9
500	44,5
630	43,6
800	42,8
1k	41,6
1,25k	41,2
1,6k	40,5
2k	39,2
2,5k	38,0
3,15k	36,7
4k	35,5
5k	32,5
6,3k	28,7
8k	25,0
10k	21,2
12,5k	---
16k	---
20k	---

Banda Ancha dB

 A 52,3
 L 80,5

M7

6

@25 -----
 Brüel & Kjær
 Analizador Modular 2260
 Programa de Análisis Sonoro BZ7210

@25 Fichero :0007,S3B

Configuración:

 Rango 10,0 - 90,0 dB
 Incidencia Sonora Frontal
 Picos Sobre 140,0 dB

Resultados Globales:

 Fecha de Inicio 2014 May 31
 Hora de Inicio 17:58:10
 Fecha de Paro 2014 May 31
 Hora de Paro 18:16:58
 Tiempo Transcurrido 00:09:56
 Número de Pausas 4
 Saturación 0,0 %
 Subgama 0,0 %

Número de Picos (A) 0
 Número de Picos (L) 0

@25 Pond, Frecuencial: A L
 dB dB

 Lpk(PM x) 86,9 93,0
 Leq 55,8 82,5
 LEP,d(8:00) 55,8
 LE(SEL) 83,4
 Lim 58,2 85,6

Pond, Temporal: S F I
 dB dB dB

 LAM x 68,6 73,7 77,3
 LAMjn 15,5 15,1 15,2
 LATm3 57,4 61,3 64,3
 LATm5 57,7 61,8 64,7

LLM x 90,4 91,8 92,4
 LLMjn 17,2 16,9 17,0
 LLTm3 83,7 85,8 87,2
 LLTm5 83,9 85,9 87,3

dB

 LLeq-LAeq 26,7
 LAIm-LAeq 2,4

LAF1,0 68,4
 LAF5,0 60,2
 LAF50,0 15,6
 LAF95,0 15,4
 LAF99,0 15,2

6

@25 -----

Brüel & Kjær
 Analizador Modular 2260
 Programa de Análisis Sonoro BZ7210

@25 Fichero :0007,S3B

Configuración:

 Rango 10,0 - 90,0 dB
 Incidencia Sonora Frontal

Espectro en 1/3-octava:

 2014 May 31 17:58:10
 Tiempo Transcurrido 00:09:56
 Número de Pausas 4
 Saturación 0,0 %
 Subgama 0,0 %

@25 LLeq

Hz	dB
12,5	73,4
16	72,5
20	72,0
25	71,4
31,5	70,1
40	69,0
50	67,0
63	64,5
80	61,5
100	58,5
125	55,0
160	51,6
200	48,3
250	45,9
315	44,6
400	44,6
500	50,0
630	49,0
800	44,7
1k	46,3
1,25k	46,9
1,6k	40,8
2k	39,0
2,5k	36,9
3,15k	35,0
4k	33,3
5k	30,7
6,3k	25,8
8k	21,4
10k	16,8
12,5k	11,6
16k	---
20k	---

Banda Ancha dB

 A 55,8
 L 82,5

M8

6

@25 -----
 Brüel & Kjær
 Analizador Modular 2260
 Programa de Análisis Sonoro BZ7210

@25 Fichero :0008,S3B

Configuración:

 Rango 10,0 - 90,0 dB
 Incidencia Sonora Frontal
 Picos Sobre 140,0 dB

Resultados Globales:

 Fecha de Inicio 2014 May 31
 Hora de Inicio 18:28:10
 Fecha de Paro 2014 May 31
 Hora de Paro 18:42:29
 Tiempo Transcurrido 00:10:00
 Número de Pausas 2
 Saturación 0,0 %
 Subgama 0,0 %

Número de Picos (A) 0
 Número de Picos (L) 0

@25 Pond, Frecuencial: A L
 dB dB

 Lpk(PM x) 86,9 93,0
 Leq 57,0 83,1
 LEP,d(8:00) 57,0
 LE(SEL) 84,8
 Llm 60,0 86,1

Pond, Temporal: S F I
 dB dB dB

 LAM x 69,7 73,7 77,3
 LAMjn 15,5 15,1 15,2
 LATm3 58,6 62,4 65,4
 LATm5 58,8 62,7 65,5

LLM x 90,4 91,8 92,5
 LLMjn 17,2 16,9 17,0
 LLTm3 84,2 86,3 87,7
 LLTm5 84,4 86,4 87,7

dB

 LLeq-LAeq 26,1
 LAIm-LAeq 3,0

LAF1,0 69,6
 LAF5,0 61,8
 LAF50,0 15,6
 LAF95,0 15,4
 LAF99,0 15,2

6

@25 -----

Brüel & Kjær
 Analizador Modular 2260
 Programa de Análisis Sonoro BZ7210

@25 Fichero :0008,S3B

Configuración:

 Rango 10,0 - 90,0 dB
 Incidencia Sonora Frontal

Espectro en 1/3-octava:

 2014 May 31 18:28:10
 Tiempo Transcurrido 00:10:00
 Número de Pausas 2
 Saturación 0,0 %
 Subgama 0,0 %

@25 LLeq

Hz	dB
12,5	74,0
16	73,1
20	72,5
25	71,9
31,5	70,7
40	69,5
50	67,5
63	65,0
80	62,0
100	59,0
125	55,5
160	52,2
200	48,9
250	46,4
315	45,1
400	45,2
500	50,6
630	50,0
800	48,3
1k	47,5
1,25k	48,0
1,6k	41,9
2k	39,9
2,5k	37,6
3,15k	35,6
4k	33,9
5k	31,3
6,3k	26,5
8k	22,2
10k	17,7
12,5k	12,5
16k	---
20k	---

Banda Ancha dB

 A 57,0
 L 83,1

M9

6

@25 -----
 Brüel & Kjær
 Analizador Modular 2260
 Programa de Análisis Sonoro BZ7210

@25 Fichero :0009,S3B

Configuración:

 Rango 10,0 - 90,0 dB
 Incidencia Sonora Frontal
 Picos Sobre 140,0 dB

Resultados Globales:

 Fecha de Inicio 2014 May 31
 Hora de Inicio 18:45:52
 Fecha de Paro 2014 May 31
 Hora de Paro 18:57:06
 Tiempo Transcurrido 00:10:02
 Número de Pausas 1
 Saturación 0,0 %
 Subgama 0,0 %

Número de Picos (A) 0
 Número de Picos (L) 0

@25 Pond, Frecuencial: A L
 dB dB

 Lpk(PM x) 92,5 93,0
 Leq 58,4 87,5
 LEP,d(8:00) 58,4
 LE(SEL) 79,6
 Llm 60,4 90,4

Pond, Temporal: S F I
 dB dB dB

 LAM x 71,1 77,9 80,1
 LAMjn 53,3 51,3 53,8
 LATm3 60,5 64,3 67,2
 LATm5 61,0 65,9 68,3

LLM x 90,7 91,9 92,6
 LLMjn 82,1 73,4 84,8
 LLTm3 88,7 90,6 91,9
 LLTm5 88,9 90,8 92,0

dB

 LLeq-LAeq 29,1
 LAIm-LAeq 2,0

LAF1,0 65,2
 LAF5,0 60,8
 LAF50,0 56,2
 LAF95,0 53,0
 LAF99,0 52,0

6

@25 -----

Brüel & Kjær
 Analizador Modular 2260
 Programa de Análisis Sonoro BZ7210

@25 Fichero :0009,S3B

Configuración:

 Rango 10,0 - 90,0 dB
 Incidencia Sonora Frontal

Espectro en 1/3-octava:

 2014 May 31 18:45:52
 Tiempo Transcurrido 00:10:02
 Número de Pausas 1
 Saturación 0,0 %
 Subgama 0,0 %

@25 LLeq

Hz	dB
12,5	78,7
16	78,3
20	77,2
25	75,5
31,5	74,2
40	72,8
50	70,8
63	68,5
80	65,7
100	62,5
125	59,0
160	55,6
200	52,5
250	50,2
315	48,9
400	48,2
500	47,5
630	47,6
800	46,3
1k	45,7
1,25k	47,9
1,6k	49,2
2k	45,6
2,5k	42,0
3,15k	40,4
4k	39,1
5k	36,9
6,3k	31,8
8k	28,3
10k	24,6
12,5k	21,2
16k	15,6
20k	10,5

Banda Ancha dB

 A 58,4
 L 87,5

LOCAL DE MEDIÇÃO M10 E M11.

M10

6

@25 -----
 Brüel & Kjær
 Analizador Modular 2260
 Programa de Análisis Sonoro BZ7210

@25 Fichero :0001,S3B

Configuración:

 Rango 20,0 - 100,0 dB
 Incidencia Sonora Frontal
 Picos Sobre 140,0 dB

Resultados Globales:

 Fecha de Inicio 2014 May 31
 Hora de Inicio 19:06:51
 Fecha de Paro 2014 May 31
 Hora de Paro 19:12:41
 Tiempo Transcurrido 00:05:09
 Número de Pausas 1
 Saturación 0,0 %
 Subgama 0,0 %

Número de Picos (A) 0
 Número de Picos (L) 0

@25 Pond, Frecuencial: A L
 dB dB

 Lpk(PM x) 87,4 103,0
 Leq 60,8 83,5
 LEP,d(8:00) 60,8
 LE(SEL) 85,7
 Llm 61,6 89,9

Pond, Temporal: S F I
 dB dB dB

 LAM x 63,4 65,0 66,6
 LAMjn 58,5 57,3 57,8
 LATm3 61,4 62,3 63,1
 LATm5 61,7 62,5 63,4

LLM x 92,5 97,0 100,0
 LLMjn 73,7 67,7 75,4
 LLTm3 86,1 90,5 93,4
 LLTm5 86,6 91,3 94,2

dB

 LLeq-LAeq 22,7
 LAIm-LAeq 0,8

LAF1,0 63,2
 LAF5,0 62,4
 LAF50,0 60,6
 LAF95,0 59,0
 LAF99,0 58,2

6

@25 -----

Brüel & Kjær
 Analizador Modular 2260
 Programa de Análisis Sonoro BZ7210

@25 Fichero :0001,S3B

Configuración:

 Rango 20,0 - 100,0 dB
 Incidencia Sonora Frontal

Espectro en 1/3-octava:

 2014 May 31 19:06:51
 Tiempo Transcurrido 00:05:09
 Número de Pausas 1
 Saturación 0,0 %
 Subgama 0,0 %

@25 LLeq

Hz	dB
12,5	74,5
16	73,4
20	72,4
25	70,2
31,5	68,7
40	66,4
50	64,1
63	63,7
80	59,8
100	57,0
125	55,9
160	55,7
200	54,9
250	52,3
315	51,6
400	52,0
500	52,9
630	56,0
800	53,8
1k	52,2
1,25k	51,9
1,6k	47,7
2k	45,8
2,5k	44,4
3,15k	43,0
4k	41,3
5k	38,9
6,3k	35,7
8k	32,2
10k	27,2
12,5k	20,1
16k	---
20k	---

Banda Ancha dB

 A 60,8
 L 83,5

M11

6

@25 -----
 Brüel & Kjær
 Analizador Modular 2260
 Programa de Análisis Sonoro BZ7210

@25 Fichero :0001,S3B

Configuración:

 Rango 20,0 - 100,0 dB
 Incidencia Sonora Frontal

Espectro en 1/3-octava:

 2014 May 31 19:23:03
 Tiempo Transcurrido 00:06:14
 Número de Pausas 2
 Saturación 0,0 %
 Subgama 0,0 %

@25 LLeq

Hz	dB
12,5	79,5
16	79,5
20	78,7
25	77,8
31,5	76,5
40	75,0
50	73,3
63	71,0
80	67,8
100	64,2
125	61,3
160	58,4
200	56,5
250	54,6
315	53,3
400	52,1
500	51,6
630	54,0
800	52,1
1k	52,7
1,25k	53,0
1,6k	49,8
2k	47,1
2,5k	45,2
3,15k	44,1
4k	42,5
5k	39,8
6,3k	36,2
8k	32,7
10k	29,8
12,5k	26,9
16k	24,5
20k	---

Banda Ancha dB

 A 61,6
 L 88,9

6

@25 -----

Brüel & Kjær
 Analizador Modular 2260
 Programa de Análisis Sonoro BZ7210

@25 Fichero :0001,S3B

Configuración:

 Rango 20,0 - 100,0 dB
 Incidencia Sonora Frontal
 Picos Sobre 140,0 dB

Resultados Globales:

 Fecha de Inicio 2014 May 31
 Hora de Inicio 19:23:03
 Fecha de Paro 2014 May 31
 Hora de Paro 19:41:15
 Tiempo Transcurrido 00:06:14
 Número de Pausas 2
 Saturación 0,0 %
 Subgama 0,0 %

Número de Picos (A) 0
 Número de Picos (L) 0

@25 Pond, Frecuencial: A L
 dB dB

 Lpk(PM x) 90,8 103,0
 Leq 61,6 88,9
 LEP,d(8:00) 61,6
 LE(SEL) 89,5
 LIm 63,8 94,0

Pond, Temporal: S F I
 dB dB dB

 LAM x 73,0 71,0 86,0
 LAMjn 59,7 58,4 58,8
 LATm3 62,6 63,9 67,6
 LATm5 63,0 64,3 68,8

LLM x 95,4 99,4 101,4
 LLMjn 74,8 71,3 77,2
 LLTm3 90,7 94,2 96,8
 LLTm5 91,3 94,9 97,5

 dB
 LLeq-LAeq 27,3
 LAIm-LAeq 2,2

LAF1,0 65,4
 LAF5,0 64,0
 LAF50,0 61,6
 LAF95,0 60,5
 LAF99,0 59,4